



**HAL**  
open science

# Analyse prospective des politiques climatiques internationales : Les émissions négatives et les pays en développement au secours du climat

Sandrine Selosse

► **To cite this version:**

Sandrine Selosse. Analyse prospective des politiques climatiques internationales : Les émissions négatives et les pays en développement au secours du climat. Sciences de l'environnement. Université de Montpellier; Mines ParisTech - Ecole des mines de Paris, 2017. tel-01689562

**HAL Id: tel-01689562**

**<https://minesparis-psl.hal.science/tel-01689562>**

Submitted on 29 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 MONTPELLIER**



# **Habilitation à Diriger des Recherches**

**Université de Montpellier  
Ecole doctorale d'Économie et Gestion**

**SOUTENUE LE 2 JUIN 2017**

---

**Analyse prospective des politiques climatiques internationales :  
Les émissions négatives et les pays en développement au secours du climat**

**Sandrine SELOSSE**

**MINES ParisTech, PSL Research University, Centre de Mathématiques Appliquées**

---

Membres du jury :

Philippe BLANC, Professeur, MINES ParisTech (président du jury)

Christophe CHARLIER, Professeur, Université de Nice Sophia Antipolis (rapporteur)

Xavier CHOJNICKI, Professeur, Université de Lille 3 (rapporteur)

Patrick CRIQUI, Directeur de Recherche, Université Grenoble Alpes (rapporteur)

Nadia MAÏZI, Professeur, MINES ParisTech (examinatrice)

François MIRABEL, Professeur, Université de Montpellier (directeur de HDR)



## SOMMAIRE

Préambule	5
Curriculum vitae	7
Partie I : Problématique de recherche	11
Chapitre 1 : Mon travail de thèse en Economie de la Science et de l'Innovation	12
Chapitre 2 : Mon projet de recherche en Prospective des Politiques Energie-Climat	38
Chapitre 3 : Mes perspectives de recherche	111
Partie II : Production scientifique et stratégie de recherche	122
Chapitre 4 : Production scientifique	123
Chapitre 5 : Stratégie de recherche	135
Chapitre 6 : Encadrement	165
Bibliographie	177
Annexes	189



## **PREAMBULE**

Ce mémoire vise à tracer le bilan, tant quantitatif que qualitatif, de mes activités de recherche et est rédigé en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches. Sa rédaction a constitué une étape aussi importante qu'intéressante en ce qu'elle m'a permis de prendre du recul sur mes travaux et de mettre en avant une stratégie de recherche pour l'avenir. Dans ce bilan de parcours, je me suis ainsi efforcé de présenter le fil conducteur qui anime l'ensemble de mes travaux et de proposer mes perspectives de recherche en vue d'encadrer des jeunes chercheurs et doctorants ou exprimant plus simplement le travail que j'envisage de mener d'ici les prochaines années. Cette candidature HDR est soumise à l'Ecole Doctorale Economie et Gestion (EDEG) de l'Université de Montpellier, mon garant étant François Mirabel, Professeur des Universités en Sciences Economiques à l'Université de Montpellier et Chercheur au Laboratoire Montpellierain d'Economie Théorique et Appliquée (LAMETA - UMR 5474). Je tiens sincèrement à le remercier pour sa confiance et ses conseils. Merci également à Sandrine Michel, Professeur en Sciences Economiques à l'Université de Montpellier pour le temps qu'elle m'a consacré.

La thèse, et plus généralement toute la période qui la caractérise, reste une étape influente dans mon parcours de recherche. Etant ensuite passé à un domaine de recherche tout à fait différent, il n'y a pas de continuité dans mon travail de recherche pour autant, c'est quand même au cours de cette période que j'ai pu acquérir un certain nombre de compétences nécessaires pour mener à bien le nouveau challenge que j'ai entrepris au sein du Centre de Mathématiques Appliquées (CMA) de MINES ParisTech dans lequel je mène maintenant mes activités de recherche. C'est au cours de ces années que j'ai en effet vécu mes premières expériences de projets de recherche et que j'ai pu participer à différents programmes et formations annexes qui sont venus bénéfiquement, j'en suis convaincue, compléter ma formation doctorale. Je dois vivement remercier mon directeur de thèse, Michel Quéré, pour la confiance qu'il m'a accordée en m'intégrant d'emblée dans ses projets de recherche, pour la liberté qu'il m'a laissée et de fait pour l'expérience qu'il a ainsi permis que j'acquière. Ce que je retire de mon doctorat dépasse largement le cadre de l'expérience d'un travail de recherche au regard du sujet de thèse à traiter permettant - et ce n'est certes pas rien - non seulement une expérience d'élaboration et d'organisation de la connaissance, mais aussi d'acquisition d'autonomie où se mêlent direction et auto-direction du travail. C'est en tout cas cette expérience enrichie que j'essaie d'apporter aux étudiants que j'encadre.

A l'issue de mon doctorat, je suis entrée au CMA pour contribuer au montage d'une chaire industrielle. J'y ai alors vu une opportunité d'éprouver un mécanisme concret de relations qui peut s'instituer entre la science et l'industrie, mon sujet doctoral. L'entrée à MINES ParisTech a permis également de mieux appréhender, de l'intérieur, ce système spécifique de la recherche française avec ses Grandes Ecoles et leurs histoires plus marquées de considérations et applications industrielles. J'y ai alors découvert un autre domaine de recherche et une autre approche, tout aussi passionnant l'un que l'autre, le secteur de l'énergie et la modélisation prospective dans lesquels je me suis investie. J'y ai également et surtout rencontré une équipe formidable dirigée par Nadia Maïzi qui restera toujours un modèle. Merci de m'avoir donné la chance de continuer l'aventure au sein du CMA.

La rédaction de ce manuscrit a représenté beaucoup de travail et de temps qu'il a parfois été difficile de monopoliser sereinement au vu de la poursuite des activités dans lesquelles je suis engagées. Je

voudrais sincèrement remercier mes collègues pour leur soutien et pour faire du CMA un lieu où il fait si bon travailler. Je remercie également tout particulièrement Nadia de m'avoir poussé à passer cette HDR mais surtout d'en avoir facilité la réalisation. Merci de m'avoir dégagé du temps en me déchargeant de certaines activités et merci à Edi Assoumou pour sa compréhension et d'avoir accepté du coup de subir une hausse de travail. A charge de revanche ! Merci à Catherine Auguet Chadaj pour son soutien et sa prévenance. Merci à Valérie Roy pour la relecture du manuscrit. Je tiens également à remercier chaleureusement Mathilde D. Pitard pour son infaillible amitié, son soutien et son humour qui m'ont été d'une aide précieuse, encore plus que sa relecture même si elle fut bien utile. Mes derniers remerciements mais pas les moindres sont adressés à Johann Thomas qui continue à m'encourager à aller au bout de mes projets et à me montrer qu'il croit en ce que je fais.

Ce manuscrit retrace ainsi le bilan de mes activités de recherche et s'articule en deux parties. La première présente ma problématique de recherche, autrement dit le cœur de mon travail de recherche. Après une présentation des études que j'ai menées dans le cadre de ma thèse de doctorat, j'y expose mon projet de recherche en modélisation prospective des questions énergie climat en mettant en exergue les questionnements qui m'ont plus spécifiquement marqués. Je termine cette partie en déroulant ma stratégie de recherche pour les années à venir. La seconde partie retrace quant à elle plus quantitativement ma production scientifique, mais aussi ma stratégie de recherche et mon expérience dans l'encadrement d'étudiants.

## CURRICULUM VITAE

**Sandrine SELOSSE**

Née le 11 mars 1978 à Armentières (59)  
Pacsée, 2 enfants (9 ans et 1 an)

### Coordonnées personnelles

1 Calade de l'escourche  
06560 Valbonne Sophia Antipolis  
Mobile : 06.14.14.74.37  
sandrine.selosse@gmail.com

### Coordonnées professionnelles

MINES ParisTech - CMA – CS 10207  
06904 Sophia Antipolis  
Bureau : 04.93.67.89.17  
sandrine.selosse@mines-paristech.fr

Fonction : Chargée de recherche

Domaines de recherche : Modélisation prospective des systèmes énergétiques ; Analyse des politiques et des négociations climatiques ; Choix technologiques : capture et séquestration du carbone, bioénergies ; Optimisation bottom-up sous TIAM (TIMES Integrated Assessment Model)

## DIPLOMES

- 2007**      **Doctorat en Sciences Economiques**, GREDEG (Groupement de recherche en Droit, Economie, Gestion), CNRS / Université de Nice Sophia-Antipolis (UNS)  
Mention Très Honorable  
Thèse : « **L'organisation des activités scientifiques et les relations science industrie. Une illustration par l'analyse des brevets demandés par le CNRS de 1995 à 2005 et par une problématique de la structuration des Génomoles en France** »  
Thèmes de recherche : Economie de la Science, Relations science industrie, Organisation et dynamiques industrielles, Transfert de connaissances, Territoire, Industrie des sciences du vivant, Génomoles, Brevets
- 2002**      **DEA Organisation Industrielle et Dynamique Economique**, UNS  
Mention Bien  
Mémoire : « **Coordination des activités industrielles et développement local : illustration par le secteur français des biotechnologies** »
- 2001**      **DEA Espace Européen Economique et Social**, Université des Sciences et Technologies (USTL) de Lille 1  
Mention Assez Bien  
Mémoire : « **La structuration des réseaux locaux d'entreprises : enquête et étude exploratoire. Le cas de l'offre de transport transmanche** »
- 2000**      **Maîtrise Economie Internationale**, Université de Lille 1  
Mention Bien  
Mémoire : « **La vague actuelle des fusions et acquisitions dans les secteurs du multimédia et des télécommunications en Europe : constat et explication** »
- 1999**      **Licence Econométrie**, Université de Lille 1  
Projet : « **Le premier quartile des DEUG Economie-Gestion de Lille I : fidélité ou hémorragie ?** »

## PARCOURS PROFESSIONNEL - RECHERCHE

- 2009/Ce jour** **Chargée de recherche**, MINES ParisTech, Centre de Mathématiques Appliquées (CMA), Sophia Antipolis  
(dont 2009/2013 comme Chercheur ARMINES)
- 2008/2009** **Post-doctorante**, CMA, MINES ParisTech/ARMINES, Sophia Antipolis
- 2005/2007** **Traductrice indépendante** pour OFCE, Paris
- 2005/2007** **Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche**, GREDEG, CNRS/Université de Nice Sophia Antipolis (UNS), Sophia Antipolis
- 2002/2005** **Allocataire de recherche**, GREDEG, CNRS/UNS, Sophia Antipolis
- 2002 (4 mois)** **Assistant Chercheur**, CNRS, Sophia Antipolis

## EXPERIENCES D'ENSEIGNEMENT

- 2011/Ce jour** **Chargée d'enseignement, CMA, MINES ParisTech, Sophia Antipolis**  
Les enjeux climatiques  
♦ Mastère spécialisé OSE (Optimisation des Systèmes Energétiques)  
Les outils de l'Innovation liés au secteur de l'énergie  
♦ Mastère spécialisé OSE (2011, 2012)  
Atelier Introduction à la modélisation prospective sous TIMES/TIAM-FR  
♦ Mastère spécialisé OSE (20 heures)  
♦ Cycle d'Ingénieur civil de MINES Nancy (20 heures)  
♦ Cycle d'Ingénieur civil de MINES ParisTech (16 heures)
- 2014/Ce jour** **Master EEET (Economie de l'environnement, de l'énergie et des transports ; ex Master EDDEE), M2 Economie de l'énergie, ParisTech**  
Les enjeux Energie-Climat (6 heures)  
Atelier Introduction à la modélisation prospective sous TIMES/TIAM-FR (dès 2016)
- 2013** **Master Energie et Environnement et BTS Energétique industrielle, Institut Supérieur des Technologies et du Design Industriel (ISTDI), Douala, Cameroun**  
Les enjeux Energie-Climat [Intervention en visio conférence] (2 heures)
- 2005/2007** **Chargée de Travaux Dirigés, UNS, Nice**  
Analyse microéconomique de l'organisation industrielle, Licence 1 AES
- 2003/2006** **Chargée d'enseignement, SKEMA Business School, Sophia Antipolis**  
Microéconomie, 1<sup>ère</sup> année
- 2002/2004** **Chargée de Travaux Dirigés, UNS, Nice**  
Economie Politique et Politiques Economiques (Semestre 1 : Grands problèmes économiques ; Semestre 2 : Economie européenne), Licence 3 Administration Publique

## COLLABORATIONS ET PROJETS DE RECHERCHE STRUCTURANTS (EN COURS)

- 2014/Ce jour** **Chaire Modélisation prospective au service du développement durable**, CMA, MINES ParisTech, Sophia Antipolis  
Consortium porté par MINES ParisTech (CMA), L'Ecole des Ponts ParisTech (CIRED) et AgroParisTech, soutenu par l'ADEME, EDF, GRTgaz, SCHNEIDER ELECTRIC et la Direction générale de l'énergie et du climat du Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, pour cinq ans, faisant suite à la Chaire Modélisation prospective lancée en 2008 (avec comme partenaires l'ADEME, EDF, RENAULT, SCHNEIDER ELECTRIC et TOTAL), dont l'objectif est de constituer une force vive dans les débats liés à la double contrainte Energie-Climat.  
→ Coordination de la Chaire MPDD (organisation des évènements, communication auprès des partenaires industriels et institutionnels)  
→ Edition des Cahiers de la Chaire (Working Paper)  
→ Animation de la plateforme de modélisation prospective.  
→ Recherche : Développement de TIAM-FR (version française de TIAM) et analyse prospective des politiques climatiques internationales
- 2016/Ce jour** **Consortium ETSAP-TIAM (Phase 2)**, coordonné par Kenneth Karlsson (DTU, Université Technique du Danemark) et impliquant plusieurs centres de recherches européens dont les axes portent sur l'analyse des systèmes énergétiques à l'aide du modèle TIAM (faisant suite à un premier consortium auquel j'ai participé dès 2011).  
→ Développement collaboratif du modèle ETSAP-TIAM<sub>2016</sub>, pérennisation du modèle et actualisation des données, identification et correction d'éventuels dysfonctionnements  
→ Test d'une plateforme collaborative Najub (Paolo Nesti Poggi, Denmark)

## ACTIVITES ACADEMIQUES

### Encadrement d'étudiants

- ◆ Doctorant MINES ParisTech, CMA, Sophia Antipolis : Marché des bioénergies et tensions sur l'eau : implémentation dans le modèle TIAM-FR (2014-Ce jour)
- ◆ Doctorant MINES ParisTech, CMA, Sophia Antipolis (en co-tutelle avec l'Université du Chili) : Modélisation Prospective TIMES pour l'Amérique du Sud (2013-2015)
- ◆ Mastère spécialisé OSE, CMA, MINES ParisTech, Sophia Antipolis (2008-Ce jour)
  - Missions industrielles : Schneider Electric, Saint Gobain, Roquette, EDF R&D, Sanofi
  - Missions académiques : Chaire Modélisation prospective, Projet ROADMAP 2050, Ecotype, Le Hublot

### Associations scientifiques

- ◆ Membre associé du GREDEG (Groupe de Recherche en Droit, Economie, Gestion), UMR 7321, CNRS et Université de Nice Sophia Antipolis
- ◆ Membre de la délégation ParisTech pour les « Conference Of Parties » (COP) sur le changement climatique (UNFCCC) depuis 2009 (COP15 Copenhague)
- ◆ Membre de l'International Association for Energy Economics (IAEE)
- ◆ Membre de l'Association Technique Energie Environnement (ATEE)

### Critique et relecture d'articles pour des revues internationales

- ◆ Energy Policy; Energy Economics; Economics Bulletin; Journal of Cleaner Production; Energies; Applied Energy; Biomass & Bioenergy; Renewable & Sustainable Energy Review

## Organisation de conférences

---

- ◆ Journée de la Chaire Modélisation prospective : éditions 2008, 2010, 2012 et 2015 à MINES ParisTech et co-organisation des éditions 2009, 2011 et 2014 à Ecole des Ponts ParisTech
- ◆ Journée de la Chaire Modélisation prospective, Spécial Partenaires : co-organisation des éditions 2010 (TOTAL), 2012 (Schneider Electric), 2013 (ADEME), 2016 (1- EDF) et 2016 (2-GRTgaz)
- ◆ Journée de la Chaire Modélisation prospective, Spécial Mastère Spécialisé OSE : co-organisation de l'édition 2016 (Thème : Micro-grids)
- ◆ Co-organisation de Side Events lors des Conférences sur les Changements Climatiques des Nations Unies (UNFCCC) : COP 15 à Copenhague en 2009 (enceinte UNFCCC), COP 17 à Durban en 2011 (enceinte ICC et Pavillon africain), COP 18 à Doha en 2012 (Pavillon européen), COP 19 à Varsovie en 2013 (enceinte UNFCCC et Pavillon européen), COP 20 à Lima en 2014 (enceinte UNFCCC et Pavillon européen), COP 21 à Paris en 2015 (Espace Générations Climat), COP 22 à Marrakech en 2016 (enceinte UNFCCC)
- ◆ European Conference on Operational Research (EURO)
  - Session « Energy in the context of the Post Paris Climate policy », EURO XXVIII, Poznan, Juillet 2016
  - Session « Challenges for a future low carbon energy system », EURO XXVII, Glasgow, Juillet 2015
  - Session « Solutions for energy transition », EURO XXVI, Rome, Italie, Juillet 2013
  - Session « Pathways toward low carbon transport », EURO XXV, Vilnius, Lituanie, juillet 2012
  - Session « Meeting the targets : policy and measures », EURO XXIV, Lisbonne, Portugal, 2010
- ◆ ETSAP-TIAM Workshop, 15 février 2012, MINES ParisTech, Sophia Antipolis
- ◆ ETSAP Workshop (co-organisation), 2008 et 2015, MINES ParisTech, Sophia Antipolis

## Contribution régulière aux conférences internationales

---

- ◆ International Energy Workshop (IEW)
- ◆ International ETSAP Worksop
- ◆ International IAEE Conference on Energy Economics
- ◆ European Conference on Operational Research (EURO)
- ◆ Conférences mondiales sur les Changements Climatiques (UNFCCC - COP)

## Vulgarisation et culture scientifique, participation à des manifestations publiques

---

- ◆ **Programme MEDITES**, référente scientifique, depuis 2016, structuration et innovation territoriales pour le développement de la culture scientifique et technique et l'égalité des chances
- ◆ **Fête de la Science** : Membre du Comité Université de la Côte d'Azur pour l'organisation de la Fête de la Science dans les Alpes Maritimes, depuis 2016
- ◆ **Fête de la Science : 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 »
  - 11 et 12 octobre 2014, Stand « Les énergies de demain : solutions pour grands défis »
  - 12 et 13 octobre 2013, Stand « L'énergie aujourd'hui et demain », en partenariat avec Gridpocket
  - 13 et 14 octobre 2012, Stand "Quelles énergies pour demain ? ", en partenariat avec Gridpocket et l'ADEME
  - 15 et 16 octobre 2011, Stand "développement durable", en partenariat avec le GREDEG (UMR 2371 - CNRS/UNS), l'ADEME et Aquassistance (association de solidarité de SUEZ)

**PARTIE I :**  
**PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE**

---

## CHAPITRE 1 : MON TRAVAIL DE THESE EN ECONOMIE DE LA SCIENCE ET DE L'INNOVATION

Mon travail de thèse est le résultat de cinq années de recherche menées entre 2002 et 2007 au sein du Groupe de Recherche en Droit, Economie et Gestion (GREDEG), une unité mixte de recherche du CNRS et de l'Université de Nice Sophia Antipolis, sous la direction de Michel Quéré, alors Directeur de Recherche au CNRS et directeur de l'équipe Innovation, Concurrence et Croissance (I2C). Ce travail se plaçait dans le domaine de l'économie de la science, de l'organisation des activités scientifiques et de l'analyse des relations science industrie. Il portait plus précisément sur une analyse exploratoire et explicative de la réorganisation industrielle des activités scientifiques en France<sup>1</sup>.

A l'instar de la politique des Génopoles<sup>2</sup> menée en France au début des années 2000 et qui préfigurera la mise en œuvre des pôles de compétitivité et le développement des plateformes de recherche, depuis quelques décennies, ce n'est plus essentiellement l'innovation privée qui est considérée comme source de croissance, mais également les nouvelles connaissances issues des progrès de la science qui sont devenues un enjeu majeur pour la compétitivité économique. L'analyse des Génopoles<sup>3</sup> montre combien les modalités différentes de fonctionnement entre les milieux académique et industriel demeurent un problème et un obstacle dans la mise en œuvre d'une véritable recherche partenariale. Les objectifs et mécanismes organisationnels de la recherche publique ne sont pas toujours compatibles avec les contraintes des entreprises. Ce problème concerne non seulement les entreprises avec lesquelles les relations sont plus difficilement fondées sur des bases pérennes, mais également des relations avec d'autres institutions scientifiques. Le particularisme français quant à la manière dont est structuré le système public de recherche – à savoir la multiplicité des institutions scientifiques – peut non seulement brouiller le paysage mais induit également des problèmes de coordination scientifique. A cet égard, la politique des Génopoles a permis quelques avancées en matière de mutualisation des équipements et de collaborations inter-organismes de recherche pour autant, l'étude de ces clusters est particulièrement instructive en ce qu'elle montre bien qu'on est encore loin d'une articulation académico-industrielle solide et structurée. Au contraire, les arrangements sont académico-académiques et s'avèrent nécessaires pour assurer la transition vers des relations science industrie. Ce problème de coordination des acteurs de la recherche est d'autant plus complexe que d'autres acteurs sont de plus en plus impliqués et constituent des réseaux plus denses. En effet, des associations de citoyens, des praticiens et des cliniciens dans le cadre des sciences du vivant par exemple s'insèrent dans le système de production des savoirs.

---

<sup>1</sup> Ce travail est disponible à cette adresse :

[http://hp.gredege.cnrs.fr/Sandrine\\_Selosse/Sommaire\\_these\\_SELOSSE\\_2007.htm](http://hp.gredege.cnrs.fr/Sandrine_Selosse/Sommaire_these_SELOSSE_2007.htm)

<sup>2</sup> Les Génopoles sont des clusters dédiés à la recherche en génomique, génétique et aux biotechnologies qui se veulent être à l'image des campus américains. Cette organisation implique sur un même site diverses catégories d'acteurs comme des institutions de recherche publique et de formations universitaires, des entreprises innovantes et des contingences locales, qui interagissent toutes au sein d'un système. Les principaux objectifs de cette structure consistent à former un environnement dédié au secteur des sciences du vivant où se mêlent la recherche, l'industrie mais aussi l'enseignement (avec la volonté de fournir des formations universitaires adaptées et répondant aux besoins des entreprises).

<sup>3</sup> Pour évaluer les effets de la politique des Génopoles en France, suite à la création en 1998 du premier biocluster français, nous avons mis en œuvre diverses investigations se déclinant en : un recueil quantitatif et la construction d'une base de données représentant l'environnement local des Génopoles, une compilation d'informations diverses visant à fixer une image économique de ces projets et enfin, une confrontation de cette image par le biais d'entretiens *in situ*. L'impact de cette politique a également été confronté à son contexte historique et à la manière dont elle a été mise en place.

Fort de ces constats, l'objet de ce travail de thèse a été de déterminer comment s'exprime et est assurée l'articulation entre recherche publique et recherche privée. Autrement dit, comment coïncident les modalités inhérentes au monde académique avec les logiques du marché, dans la mesure où ces nouveaux enjeux et rôles remettent en cause les rapports entre science, technologie et économie. Ce travail a répondu à cette question en deux temps. Une première recherche a consisté en une contextualisation historico-politique de la manière dont s'est construit et a évolué le système de production des savoirs. J'ai alors opéré une comparaison France/États-Unis à travers une large revue de littérature. Étant donné la spécificité institutionnelle de la recherche française qui en est ressortie, je me suis alors recentrée sur le cas français et ai mené des analyses plus spécifiques touchant à des formes concrètes de relations science industrie, à savoir les brevets académiques, les collaborations avec les entreprises (sous forme de co-dépôts de brevets ou de recherches partenariales) et la création de start-ups. Ces objets constituent en effet des formes capitales du débat moderne sur les relations science industrie. Pour se faire, j'ai analysé les brevets demandés par le CNRS de 1995 à 2005 en me focalisant dans un premier temps sur les données bibliographiques et plus précisément sur les informations relatives aux pays de dépôts, aux demandeurs, aux inventeurs et aux classes technologiques ; puis dans un second temps sur les brevets co-demandés par une entreprise en faisant l'hypothèse que ces brevets résultaient d'une collaboration de recherche entre le CNRS et cette dernière (et éventuellement d'autres acteurs). Outre l'importance du domaine des sciences du vivant et le recours à des connaissances multidisciplinaires, cette analyse a mis en évidence l'implication accrue, au côté du CNRS, des entreprises dans cette problématique de « marchandisation » des connaissances scientifiques. En effet, sur les 2 838 brevets disponibles sur la base de données européenne Esp@cenet d'où sont extraites les informations-brevets analysées, 470 ont ainsi été co-demandés par au moins une entreprise. Ces co-demandes surviennent en fait essentiellement à partir de 2001 (403 co-demandes de brevets) et sont principalement le fait de grands groupes industriels.

Ce travail de thèse, dont la première partie de ce chapitre propose une synthèse, a constitué une première expérience de recherche, au sens d'une réflexion plus approfondie portée sur une problématique exprimant un enjeu sociétal et conduisant à la transformation d'un système établi d'acteurs structurés. Il s'est vu complété par la participation à différents projets de recherche qui seront présentés dans la seconde partie de ce chapitre.

## **I. RECHERCHE SUR L'ORGANISATION DES ACTIVITES SCIENTIFIQUES ET LES RELATIONS SCIENCE INDUSTRIE**

Depuis le milieu des années 1990, les connaissances ont pris une importance telle pour l'économie des pays développés que les enjeux de croissance reposent désormais sur la capacité à les acquérir, les créer et les utiliser (OCDE, 1996). Les nouvelles connaissances sont devenues un enjeu majeur pour la compétitivité économique, expliquant qu'au Sommet économique et social européen de Lisbonne en 2000, l'Union européenne s'est donné comme objectif stratégique pour la première décennie du nouveau millénaire de « devenir l'économie de la connaissance la plus compétitive et la plus dynamique, capable d'une croissance économique durable, accompagnée d'une amélioration quantitative et qualitative de l'emploi dans une plus grande cohésion sociale ». Cette ambition a été réaffirmée en mars 2010 dans la stratégie Europe 2020 élaborée par la Commission européenne en visant une « croissance intelligente, durable et inclusive ». Un nouveau régime d'innovation se

développe reflétant alors le niveau toujours plus complexe et coûteux des technologies et l'importance accrue des connaissances scientifiques dans les processus d'innovation. L'environnement dans lequel les activités scientifiques évoluent connaissant de profondes transformations, on assiste à une volonté des pouvoirs publics de réorganiser les activités scientifiques dans le sens d'une transition d'un système dichotomique de production des connaissances scientifiques vers un système de co-production de ces dernières. Traditionnellement en effet, sphères scientifique et industrielle sont considérées comme contribuant de manière parallèle à la production des nouvelles connaissances scientifiques. Même si des relations entre la science et l'industrie ne sont pas un phénomène nouveau en soi, chacun se nourrissant de l'autre respectivement, des liens pouvant se nouer au gré de contrats de recherche et des transferts se développer entre ces deux mondes, « la recherche est l'affaire des scientifiques et l'innovation celle des entrepreneurs » (Robert Boyer et Michel Didier, Innovation et croissance, Rapport 1998, Conseil d'analyse économique). Cette transformation s'est alors notamment traduite par des enjeux de valorisation des résultats scientifiques s'exprimant par exemple par l'encouragement à la création et au développement d'entreprises innovantes (des start-ups académiques) et par l'accroissement de la protection intellectuelle assurée par les institutions scientifiques (dépôts de brevets et concessions de licences). Les attentes des pouvoirs publics se sont également situées dans la mise en place de collaborations solides entre les institutions scientifiques et les entreprises. Les institutions scientifiques, et notamment les universités, sont appelées à jouer un rôle croissant, et surtout un rôle économique, dans l'innovation et la croissance. De nouvelles structures émanant d'initiatives publiques sont mises en place afin de soutenir cette transition. La pression que font peser les pouvoirs publics sur les institutions scientifiques afin de produire une connaissance qui sera ensuite valorisée par le marché survient alors comme une légitimation des financements qui leur sont alloués et comme un changement profond de leurs pratiques (Kreimer, 2003). L'objectif visé est alors de conduire au développement d'une recherche partenariale, à des formes de co-production de savoirs scientifiques et technologiques et à une plus forte applicabilité des savoirs. Le débat n'est ainsi plus de savoir qui maîtrise les applications industrielles de la science et de la technologie mais qui maîtrise les connaissances qui permettraient ces applications industrielles.

Ces transformations allant de pair avec des enjeux de croissance économique et d'innovation, la science est désormais considérée comme une activité économique et comme le moteur de la croissance des pays développés. L'économie mondialisée s'exprimant par une forte compétitivité par les prix qui donne un avantage certain aux pays émergents, la compétitivité par l'innovation est alors privilégiée. Parmi les conséquences de ces transformations des systèmes d'innovation et de la recherche, on a pu assister à des changements dans les pratiques en matière de propriété intellectuelle. De nos jours, le brevet est de plus en plus déposé par des chercheurs publics ou privés, intéressés par la valorisation de leur recherche. Il peut alors être suivi par une négociation de licences ou une exploitation au sein d'une start-up. Ce phénomène a été initié dans les années 1980 par les Etats-Unis qui sentaient leur suprématie industrielle menacée par le Japon et l'Europe qui s'appropriaient les technologies développées aux Etats-Unis. En France, c'est surtout à la fin des années 1990 que diverses mesures ont été mises en place. On peut citer la loi sur l'innovation et la recherche de 1999, la création des réseaux de recherche et d'innovation technologiques, le développement des fonds d'amorçage et des incubateurs, le concours de création d'entreprises technologiques. Leur but était d'accompagner ce mouvement qui était alors bien engagé outre Atlantique, mais qui restait encore incertain et fragile en Europe et notamment en France où la progression de la valorisation économique de la recherche

demeurait assez limitée. Parallèlement à cela, s'est développée dès le milieu des années 1990 l'économie de la connaissance, un courant de pensée économique axé sur le rôle moteur de la connaissance dans la compétitivité des entreprises et la croissance des pays. Cette discipline cherche alors à définir et à analyser ce concept central de l'organisation et du développement économique. Il marque également un moment de l'histoire où la part de la connaissance dans l'ensemble des facteurs de production prend une place de plus en plus importante.

### **A. L'institutionnalisation de la recherche publique**

Ainsi, suivant un développement chronologique, j'ai tout d'abord retracé l'évolution et les caractéristiques des systèmes de production des connaissances scientifiques. Dans un premier temps, j'ai expliqué comment, en France comme aux Etats-Unis, s'est construit et institutionnalisé un système de production des savoirs au sortir de la seconde guerre mondiale, suivant une organisation dichotomique entre le milieu académique d'un côté et la sphère industrielle de l'autre, et expliquant alors le fossé qui s'est creusé entre science et industrie. Cette analyse a de plus mis en évidence la manière dont la science économique est venue rationaliser cette institutionnalisation politique et s'est alors principalement concentrée sur la question technologique.

En effet, après la seconde guerre mondiale, un modèle d'organisation de la production des connaissances scientifiques s'est progressivement mis en place, reposant sur une vision linéaire du processus d'innovation. Il a convergé vers un principe d'organisation dichotomique des activités de recherche au sens où science et industrie évoluent parallèlement de manière cloisonnée, en entretenant essentiellement des relations ponctuelles (Bertha, 1996). Il est ainsi largement admis, au regard de cette organisation que le milieu académique a la charge ou la mission de la recherche fondamentale, alors que la sphère industrielle se focalise sur la recherche appliquée et le développement. Cette répartition s'est notamment imposée du fait du problème du financement de la recherche fondamentale dont le retour sur investissement s'avère trop faible pour les entreprises. Ces dernières ne peuvent en effet globalement pas entreprendre ce type de recherche, en dehors d'un très petit nombre de grandes entreprises qui auraient les moyens humains et financiers de courir l'aventure pavée d'incertitudes que ce soit sur les « chances » ou sur l'échéance de résultats. On notera d'ailleurs qu'en France, en 1920, on ne compte qu'une douzaine de laboratoires privés développant également des activités de recherche fondamentale (Woronoff, 1998). Le financement de celle-ci en revient ainsi à l'Etat, comme les articles de Nelson (1959) et d'Arrow (1962) en ont apporté la justification économique et ont par là même imposé cette vision dichotomique. En effet, pour Arrow, une frontière existe et doit être maintenue entre les deux mondes exprimant d'un côté, les activités de recherche de base et de l'autre, les autres activités inventives conduisant aux innovations.

Au vu de ce système, on est alors loin de celui qui était à l'œuvre dans les pays industrialisés depuis le 19<sup>ème</sup> siècle où l'industrie nouait de nombreuses relations, notamment financières, avec les tenants de la science et où, à l'image du laboratoire central de Saint Gobain créé en France en 1923-1924, universitaires et ingénieurs y travaillaient de concert, même si la recherche de terrain, en usine, n'était pour autant pas abandonnée (Woronoff, 1998). En effet, si on se concentre sur les relations qui s'opéraient pendant cette période, notamment au cours de la seconde industrialisation, dès 1880, les liaisons entre science et techniques industrielles, qui étaient encore problématiques au 19<sup>ème</sup> siècle, sont apparues davantage assurées, presque systémiques, ceci résultant du fait que soit des théories déjà considérées comme classiques ont trouvé leurs applications, soit la « science en marche » a suggéré ou

facilité un développement de la technique. L'électricité et les matériaux constituent de bons exemples de domaines où « les découvertes scientifiques ont éclairé le chemin des industriels », la science procurant alors la compréhension des phénomènes (ibid., pp. 404-405). Mais pour autant, les acteurs de la recherche fondamentale ne s'inséraient alors pas encore dans un système institutionnalisé, structuré et organisé, bénéficiant qui plus est d'un financement majoritairement, si ce n'est exclusivement, public. Jusqu'au milieu du 20<sup>ème</sup> siècle, la science était en effet surtout le fait de savants, d'inventeurs indépendants pour qui « science was a country gentleman's pastime, not a job that he needed to sustain himself » (Aszodi, 2007, p. 25). En fait, Gay-Lussac est le premier savant du début du 19<sup>ème</sup> siècle à s'inscrire en rupture avec les « amateurs éclairés » qu'étaient la plupart des autres scientifiques de l'époque tant en France qu'à l'étranger. Il est le premier professionnel de la science à temps complet et il n'a de cesse de rechercher des liaisons entre science pure et science appliquée notamment au profit de l'industrie. Ses activités s'apparentent alors aux comportements des scientifiques et des ingénieurs de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle qui résolvaient des problèmes de nature économique à court terme en effectuant des tests, des essais et de la standardisation pour les entreprises. D'ailleurs, ces dernières, tout comme l'Etat et les structures d'enseignement étaient alors caractérisées par la volonté de se coordonner pour pallier les problèmes du marché et favoriser les capacités d'adaptation des entreprises aux changements technologiques. D'un point de vue scientifique, en pleine période de révolution industrielle, les industriels cherchèrent le concours des savants pour améliorer la qualité des produits manufacturés, la qualité des produits chimiques utilisés ainsi que leur processus d'utilisation. D'ailleurs, Auger (2003) a étudié des entreprises localisées dans les villes le long de l'axe du Rhin, comme Mulhouse, Stuttgart et Mannheim, qui connurent une industrialisation croissante entre 1880 et 1920, dans les secteurs des textiles, de la chimie, de l'électrotechnique et de la métallurgie. Parmi les facteurs explicatifs de cette croissance, il attire l'attention sur les scientifiques, les ingénieurs et les industriels qui organisèrent la recherche industrielle au niveau régional. Force est de noter en outre que la place des ingénieurs est toute particulière en France. Au lendemain de la première guerre mondiale, le constat fut fait que nul progrès ne pouvait survenir sans faire participer l'élite scientifique mais ce sont surtout les ingénieurs qui sont alors venus incarner cette dernière. En effet, on observe à cette période une transformation des modes d'enseignement supérieur technique avec la multiplication d'écoles spécialisées en étroite relation avec l'industrie. Déjà vers les années 1870, les carences de l'enseignement supérieur et de la recherche avaient été constatées et avaient engendré un premier mouvement de création d'écoles d'ingénieurs à Paris, et dans de nombreuses villes de province, comme Grenoble, Lille, Nancy, etc. L'initiative revient alors surtout aux industriels, aux facultés ou aux chambres de commerce. Les industriels régionaux contribuent en effet largement, avec l'Etat, au financement des premières écoles de formation d'ingénieurs, souvent dans des secteurs liés aux ressources de la région. Ces écoles recevront alors souvent les soutiens du mécénat industriel et régional (Woronoff, 1998, Ali Benali, 2003).

De l'autre côté de l'Atlantique, jusqu'à l'après Seconde Guerre mondiale, la science ne semble pas susciter d'intérêt particulier dans les sphères politiques où il n'existe pas d'organisation spécifique et reconnue ayant pour mission de fédérer les activités scientifiques. Des instances existent, comme la National Institute of Health fondée en 1887, mais elles ne concernent que des domaines particuliers, comme les sciences médicales. Les politiques globales concernant la science semblent absentes et la réalisation, ainsi que l'organisation de la recherche académique, relèvent de chacune des universités.

Certes, ce non-interventionnisme ne se limite pas qu'à la science. Depuis 1789, le gouvernement fédéral américain n'est que lentement intervenu de manière active dans les affaires de la nation. L'activisme gouvernemental ne s'est accéléré qu'à la suite des événements qui ont suivi 1929 et en particulier après l'investiture de F. D. Roosevelt à la présidence en 1933. Puis, ce n'est vraiment qu'après la Seconde Guerre mondiale que les politiciens, aussi bien que les citoyens, ont appelé le gouvernement à intervenir pour aider à surmonter la crise, en reconnaissant que dans de nombreux domaines, un soutien continu du gouvernement serait dans l'intérêt de la nation. La recherche scientifique fondamentale fait justement partie de ces domaines requérant une implication accrue du gouvernement (NSF, 1994), dans la mesure notamment où l'industrie ne peut fournir le soutien nécessaire à la recherche fondamentale en raison des profits attendus, perçus comme trop bas et surtout envisageables qu'à plus ou moins long terme. Il faut alors attendre 1945, et le fameux rapport de Vannevar Bush (qui a convaincu le Président Roosevelt de lui en faire la demande), *Science The Endless Frontier*, pour que l'enjeu des activités scientifiques soit mis en exergue et que notamment soit créée et mise en place la National Science Foundation (NSF)<sup>4</sup>. Répondant à des préoccupations de défense et non à des enjeux économiques, ce rapport a été influent et a guidé l'orientation de l'organisation de la recherche académique. Il marque le début de nouvelles considérations quant à la recherche fondamentale et aux nouvelles connaissances qui en sont issues. Il s'appuie notamment sur le problème de sous-investissement en recherche fondamentale de la part des entreprises : « We cannot expect industry adequately to fill the gap. Industry will fully rise to the challenge of applying new knowledge to new products. The commercial incentive can be relied on for that. But basic research is essentially non-commercial in nature. It will not receive the attention it requires if left to industry » (Bush, 1945, p. 18). Il est vrai que la recherche fondamentale est trop large en termes d'applications possibles et trop indirectement liée à des processus industriels pour qu'une industrie particulière s'engage dans de la recherche fondamentale. Ainsi, au sortir de la guerre, Bush (appuyé par de nombreux scientifiques) est parvenu à convaincre le gouvernement américain de maintenir un niveau plus élevé de financement de la recherche, et ce, même en période de paix. Pour ce faire, son rapport met en exergue la contribution des scientifiques au développement de nouvelles technologies ayant facilité la victoire des alliés et l'apport des scientifiques à l'amélioration de l'espérance de vie dans les décennies précédentes. Il insiste d'une part, sur la nécessité pour le gouvernement américain de poursuivre ses efforts de financements en recherche militaire, notamment afin de ne pas perdre les compétences qui ont pu être acquises pendant la guerre, et d'autre part, sur le fait qu'il est vital pour la nation de fournir un important soutien public à la recherche médicale. Concernant la recherche fondamentale entreprise par les universités, Bush invite par ailleurs le gouvernement à (s')investir de manière plus importante en matière de financements. Il appelle ainsi le gouvernement à considérer ce soutien à la recherche comme relevant de sa responsabilité et à partir de là, à le garantir.

La publication du rapport Bush et les retombées qu'il a engendrées en matière de politiques de la science marquent également un changement en terme d'analyse dans la mesure où il met en évidence l'enjeu que constitue la science pour l'économie et notamment l'importance de sa large diffusion dans tous les milieux que ce soient le monde académique ou la sphère industrielle. Il met également en exergue la nécessité que ce soit l'Etat qui prenne en charge son financement. L'analyse économique va

---

<sup>4</sup> Ainsi, « *by the National Science Foundation Act of 1950 the Congress established the National Science Foundation to promote the progress of science ; to advance the national health, prosperity, and welfare ; to secure the national defense ; and for other purposes.* » (Extrait du premier rapport annuel de la NSF, 1950-1951).

donc venir renforcer ce soubassement idéologique et politique en lui donnant une autre justification. Le soutien à la science ne sera plus tant justifié par la politique de défense que par celle du développement économique de la nation que le secteur privé à lui seul ne peut assumer au regard de la prise en charge du financement de la recherche fondamentale. On peut noter que l'article de Nelson (1959), séminal en matière d'analyse économique de la science, est publié pendant la période d'investissement du président Eisenhower (1953-1961). Pendant cette période, les scientifiques sont confrontés à la réticence, la résistance même, du gouvernement à verser des fonds publics à la recherche académique. Pour Eisenhower, le gouvernement doit en effet tenir un rôle limité dans la plupart des domaines, le budget fédéral devant lui-même être très limité. C'est donc au secteur privé qu'incombe le devoir de supporter le financement de la recherche. Certaines activités répondaient bien sûr à ce critère mais, au regard de la vision du président, un financement significatif de la science et de la technologie n'en répondait pas clairement. A la fin de son administration toutefois, le président Eisenhower était implicitement convaincu que des défaillances de marché incorrigibles affectaient le secteur privé quand celui-ci se lançait dans la recherche fondamentale et qu'il ne pouvait la financer aussi bien que le gouvernement : « The president swung philisophically to government support, because there seemed to be no alternative » (Kistiakowsky, 1976, Oral History Transcript. 17 Nov., 13; in Averch, 1985, p. 16). Au regard des défaillances de marché, ce discours émane en fait de la rationalisation économique qui a été faite dès la fin des années 1950 par des économistes comme Nelson, de l'argumentaire politique. Ce qui est argumenté ce n'est plus les avantages ni les intérêts de la recherche fondamentale pour la société et la croissance mais plutôt l'incapacité des marchés privés à financer un niveau suffisant de recherche fondamentale. En rationalisant l'argumentaire scientifique et politique et en reconstruisant économiquement ces problèmes de négociation et d'allocation des ressources, les articles de Nelson (1959) et d'Arrow (1962) vont fournir cette justification économique.

Ainsi, l'organisation dichotomique de la recherche publique/privée qui s'est imposée au milieu du 20<sup>ème</sup> siècle rompt avec les schémas antérieurs et notamment marque une rupture avec l'influence des industriels qui décroît alors que l'Etat s'investit dans le financement de la recherche académique et plus précisément dans la recherche fondamentale. Puis les environnements technologique, financier et économique vont évoluer et impliquer des acteurs « traditionnellement » cloisonnés. Les liens se tissant entre les sphères académique et industrielle vont alors s'exprimer à travers l'émergence de nouveaux types d'acteurs, comme les petites firmes innovantes, alors même qu'au 19<sup>ème</sup> siècle, et jusque la fin du 20<sup>ème</sup> siècle (autrement dit avant l'avènement des économies centrées sur la science), la recherche privée était essentiellement le fait de grands industriels. Le modèle de développement des relations science industrie va alors s'inspirer de celui suivi par les Etats-Unis, les universités américaines apparaissant plus largement engagées et avancées dans des stratégies de commercialisation des connaissances scientifiques qu'en Europe et plus particulièrement qu'en France qui peine encore à développer un environnement favorable à l'émergence de relations entre sphères académique et industrielle. Ainsi, dans ces économies du savoir, les politiques publiques sont l'expression de nouveaux enjeux qui s'expriment par une volonté d'accroître la contribution scientifique à l'innovation et in fine le bien-être social (Konrad et Truffer, 2006), d'autant plus que les relations science industrie s'expriment également à travers des arrangements hybrides par lesquels les sphères académique, industrielle et gouvernementale s'entremêlent (Etzkowitz et Leydesdorff, 1997, 2000 ; Nowotny et al., 2001).

## **B. Un environnement de production des connaissances scientifiques en mutation**

Dans un second temps, j'ai montré comment ce système s'est adapté à l'évolution de son environnement dès le début des années 1980. En effet, des transformations juridique, technologique, économique et financière peuvent expliquer les nouvelles logiques organisationnelles liant la science et l'industrie. Les différences de trajectoires suivies par la France et les Etats-Unis ressortent alors tout particulièrement, notamment concernant les marchés financiers et les adaptations juridiques à ces contextes en évolution. Je me suis alors efforcée de caractériser le développement qui a résulté d'un système alternatif de co-production des savoirs. J'ai présenté les différentes formes de relations science industrie et également les développements théoriques résultant de la nouvelle perception de la science. J'ai pu mettre en évidence les différences entre les situations américaine et française et à travers elles l'importance des particularités nationales dans la structuration des activités scientifiques. Plus précisément, les Etats-Unis apparaissent souvent comme un modèle de développement en matière de relations science industrie et de valorisation économique des résultats scientifiques. Ce modèle a inspiré des pays européens et notamment la France dont les actions publiques visent à proposer un terrain similaire. Le mouvement est alors initié par des politiques publiques dont la conception répond à une logique de rattrapage du retard par rapport aux Etats-Unis. Pourtant, comme le met en évidence la contextualisation historico-politique de l'organisation des activités scientifiques opérée via la comparaison France/Etats-Unis, des différences sont survenues assez tôt entre les trajectoires de développement suivies par les deux nations. Elles concernent tant le système de production des connaissances que ses transformations modernes. Les problèmes initialement identiques concernant les activités de recherche scientifique ont été pris en charge de manière distincte des deux côtés de l'Atlantique et conduisent à des conditions et des caractéristiques différentes de l'organisation des activités scientifiques.

En France, le renforcement des mécanismes d'appropriation touchant le milieu académique résulte essentiellement de la Loi de l'innovation de 1999, même si la volonté des pouvoirs publics s'affiche à travers plusieurs lois qui verront le jour essentiellement entre 1982 et 1999, date à laquelle le tournant relatif au droit de propriété intellectuelle auquel peuvent prétendre les organismes publics de recherche va être marqué. Par cette mesure, les pouvoirs publics vont chercher à inciter les acteurs de la recherche, publique et privée, à modifier leurs comportements en vue de plus nombreuses applications commerciales des résultats de la recherche scientifique. Le but est de promouvoir le transfert des résultats de la recherche financée par le secteur public vers l'industrie, ainsi que la création de firmes innovantes. Cette loi de 1999 constitue une réponse à la faiblesse structurelle qui a été constatée en matière de valorisation et d'exploitation commerciales des résultats de la recherche académique et en matière de relations entre la recherche publique et les entreprises. Elle se présente également comme l'aboutissement des réflexions qui sont issues des évolutions connues par les Etats-Unis en matière de propriété intellectuelle (avec notamment le Bayh-Dole Act de 1980). Pour autant, les dispositions mises en place en France n'auront pas le même impact et surtout, suivront une autre dynamique, mettant en évidence que, les systèmes français et américain n'étant pas régulés de la même manière, des actions spécifiques s'imposent. La Loi sur l'innovation et la recherche du 12 juillet 1999 permet aux chercheurs et aux enseignants-chercheurs de valoriser eux-mêmes les résultats de leurs travaux en participant à la création d'une entreprise, en détenant une participation dans son capital social, en devenant membre du conseil d'administration ou de surveillance d'une société anonyme ou en apportant leur concours scientifique à une entreprise. Désormais, ils peuvent le faire sans devoir

rompre définitivement les liens avec leur organisme d'origine grâce à des mesures d'incitation à la mobilité (mise à disposition, détachement auprès d'une entreprise). On retrouve ici l'esprit du Bayh-Dole Act de 1980, la Loi sur l'innovation survenant à la suite de diverses réflexions portant sur ce dernier et sur l'observation du système américain. De décembre 1999 (date de mise en œuvre de ces dispositions) à juillet 2000, 54 dossiers de création d'entreprises avaient reçu un avis favorable de la commission de déontologie (Schwartzenberg, 2000). L'objectif de cette loi est ainsi de favoriser la mobilité des chercheurs vers le milieu industriel, comme à travers des conditions fiscales particulières pour les entreprises innovantes qui résulteraient de cette valorisation (commerciale) des résultats de la recherche publique et la création d'incubateurs d'entreprises. Elle vise également à inciter les entreprises elles-mêmes à se rapprocher des universités et des centres de recherche publics, par diverses actions de valorisation et la création de cellules de valorisation dédiées à cet effet. La Loi sur l'innovation de 1999 va également apporter un cadre réglementaire plus adapté et ainsi, de nouveaux éléments de réponse en facilitant et sécurisant les transferts de connaissances entre milieux académique et industriel, à travers le brevet, la concession de licences et la création d'entreprises sur la base des brevets issus de la recherche publique.

Concernant la création d'entreprises innovantes issues du milieu académique, que ce soit en France ou aux Etats-Unis, un autre point va être crucial dans la réussite de ces essaimage, il s'agit de la question de leur financement. Cette question va renvoyer au développement d'un nouveau régime financier qui émergera tout d'abord aux Etats-Unis, notamment eu égard aux nouvelles opportunités apportées par l'accès des acteurs de la recherche publique à la valorisation de leurs travaux et au droit de propriété intellectuelle. En effet, les effets du changement de régime des droits de propriété intellectuelle (DPI), notamment aux Etats-Unis, au cours des vingt dernières années du 20<sup>ème</sup> siècle, qui ne sont certes pas aussi spectaculaires que certains l'annoncent, ont été une augmentation du nombre de brevets sur des inventions réalisées au sein des universités (Hall, 2001). On a également pu assister à la création de start-ups issues des organismes publics de recherche créées pour exploiter commercialement les résultats de leurs travaux. L'évolution des moyens de financements des activités de recherche s'exprimant notamment par l'émergence du capital-risque a favorisé, du moins aux Etats-Unis, le développement des relations science industrie, et notamment l'essor de ces start-ups. Le nouveau régime des DPI, et tout particulièrement le Bayh-Dole Act qui introduisit une série de nouvelles dispositions complémentaires en la matière (notamment en 1984 et en 1986), a ouvert le domaine des brevets à d'autres acteurs, en l'occurrence les universités et les laboratoires de recherche académique. A partir de là, le dépôt de brevet sur des résultats de recherche financée par fonds publics a été autorisé. Il est également rendu possible de céder ces brevets sous forme de licences exclusives à des firmes privées ou de constituer avec elles des joint ventures dont la vocation sera alors de tirer parti des connaissances cédées, soit pour en faire commerce, soit pour les exploiter en vue de parvenir à des produits commercialisables.

Le changement de régime des brevets a de fait engendré une évolution déterminante du système de production de nouvelles connaissances scientifiques qui s'exprime notamment par la marchandisation de la connaissance au sens où cette dernière pouvant être appropriée (par les brevets et les licences), elle devient une marchandise. Mais cette transformation va accompagner et renforcer un autre bouleversement, qui surviendra aux Etats-Unis dans les années 1980, à savoir l'introduction du capital financier dans ce nouveau système de production des savoirs, en raison de ces nouvelles opportunités de profit qui sont apparues à cette époque. Une sorte de « complémentarité » va ainsi s'instaurer entre

le droit de propriété intellectuelle et le nouveau régime réglementaire entourant le marché financier. Ils vont s'autorenforcer, dans le sens où les nouvelles possibilités offertes aux acteurs publics de la recherche en matière d'exploitation commerciale de leurs résultats à travers des dépôts de brevets, des concessions de licences et la création de start-ups, vont trouver de nouvelles formes de financement dans le nouveau système financier. Réciproquement, l'existence de possibilités de financement va contribuer à renforcer les effets des nouveaux DPI. Puis de développements en développements, d'opportunités en opportunités, le système financier dans son ensemble va se trouver bouleversé, notamment au regard des mutations technologiques et des industries qui leur sont liées. La France cherchera elle aussi à suivre cette dynamique insufflée par les Etats-Unis mais disposant d'outils différents, la transition sera de nature différente. Les transformations seront plus progressives et plus institutionnalisées engendrant au final d'autres effets et notamment un système de capital-risque assez éloigné du modèle américain. Le développement des secteurs centrés sur la science, comme les biotechnologies ou les technologies de l'information et de la communication, constitue un des facteurs à prendre en considération pour expliquer ce dépassement progressif des frontières séparant le milieu académique de la sphère industrielle. L'évolution des technologies elles-mêmes a conduit les firmes à revoir leur stratégie d'innovation. La réorganisation moderne des activités scientifiques étant déterminée par la manière dont le système s'est construit et a évolué suivant leurs contextes historique et politique, ce premier travail de recherche exploratoire met en avant le caractère déterminant des politiques publiques dans l'organisation des activités scientifiques. Le contexte national apparaît alors déterminant dans la problématique des relations science industrie, comme leurs caractéristiques, leur mise en œuvre et leur évolution. Autrement dit, il apparaît largement que les particularités institutionnelles du modèle français influencent les relations que la science et l'industrie peuvent nouer entre elles, que ce soit dans leur forme, leur importance ou leurs résultats. De la même manière, il ressort que les politiques visant à développer les activités de valorisation économique des institutions scientifiques doivent tenir compte de cette spécificité contextuelle et institutionnelle. Etant donné les particularités et les différences organisationnelles et culturelles qui existent entre la France et les Etats-Unis, le suivisme constaté dans les politiques publiques constitue une manière inopportune de chercher à favoriser les relations science industrie en France et d'encourager la valorisation économique des résultats scientifiques.

### **C. L'analyse des brevets CNRS-Entreprises**

La communauté académique et la sphère industrielle sont ainsi conduites à s'ouvrir mutuellement, à dépasser leurs frontières et à tenter de co-produire des connaissances scientifiques à travers diverses relations pouvant prendre des formes variées. Les profonds changements rencontrés par les systèmes de recherche tendant vers une valorisation économique accrue des résultats essentiellement financés par fonds publics, se sont notamment exprimés par une forte croissance du nombre de brevets déposés par les institutions scientifiques. Les brevets représentent un enjeu déterminant dans la problématique de l'évolution du système de recherche académique. Ils apparaissent au cœur des débats sur les transformations connues par le système public de recherche et notamment en ce qu'ils symbolisent souvent cette entrée des préoccupations de marché dans la sphère académique et l'introduction de nouveaux enjeux économiques dans l'environnement de la recherche publique. L'importance des brevets est incontestable et nombre d'études s'accordent sur le fait que les brevets constituent un indicateur important de l'activité innovante, le brevet apparaissant comme une source d'information

temporelle, géographique, sectorielle et technologique sur l'activité inventive et innovante<sup>5</sup>. Etant donné que la plupart des pays exigent que l'invention soit divulguée de façon suffisamment claire et complète pour pouvoir être exécutée par un homme de métier, un document de brevet contient bien plus de renseignements détaillés sur une technologie que tout autre type de publication scientifique ou technique. Il s'agit également d'une source d'information unique puisque l'on estime, en moyenne, qu'environ 70% de l'information divulguée dans les brevets n'est jamais publiée ailleurs. C'est la collection de documentations techniques sur les nouvelles technologies la plus importante, la plus à jour et la mieux classée (OMPI, 2005). En dépit de quelques limites que l'on peut adresser à cette source d'information<sup>6</sup>, les documents-brevets n'en demeurent pas moins un instrument essentiel afin d'analyser les tendances en matières de diffusion des technologies fondamentales au vu d'établir des profils de spécialisation pour des pays ou des entreprises. L'objet de cette recherche ne vise cependant pas à débattre des forces et faiblesses de cet indicateur. Ma démarche diffère en effet quelque peu des travaux en économie de la science généralement menés sur les brevets en ce sens où ce sont les données bibliographiques apparaissant dans les demandes de brevets que j'ai analysées. Un document-brevet contient, sous une forme normalisée, quantité d'informations sur l'état de la technique considéré dans le contexte international, compte tenu des évolutions technologiques dans le domaine technique en question. Mais l'information en matière de brevets n'englobe pas seulement le contenu des documents de brevet publiés mais aussi, les données bibliographiques qu'il contient fournissent diverses informations extrêmement utiles pour identifier, localiser et retrouver les documents de brevets (OMPI, 2005). Ces données bibliographiques m'ont été particulièrement utiles pour dresser un profil de l'environnement dans lequel ont été effectuées les demandes de brevets du CNRS sur lequel j'ai focalisé notre attention. En dépit de son importance – le CNRS constituant la plus importante institution scientifique de recherche française – et comme le signalent Geuna et Nesta (2006), peu d'études portent sur cet organisme de recherche, la plupart des travaux traitant des universités. Pourtant, quant à ses relations industrielles, le CNRS est loin d'être resté en marge avec 2 100 contrats signés avec des industriels en 2005. En outre, il compte cette même année à son actif 2 649 brevets principaux et 9 804 avec les extensions. Il est également détenteur de 1 057 licences actives qui lui ont rapporté 53,3 millions d'euros hors taxes de redevances en 2005<sup>7</sup>. Ainsi, le CNRS apparaît comme une figure emblématique de cet indicateur qu'est le brevet qui constitue lui-même une forme déterminante dans la problématique des relations science industrie.

---

<sup>5</sup> Par exemple, dans l'industrie des médicaments, un laboratoire peut déposer en une seule année plus de 3 000 demandes de brevets et dans l'industrie électronique les leaders atteignent des sommets avec en moyenne 15 000 demandes de brevets par an, et ce, malgré les questions épineuses des logiciels libres ou encore de la brevetabilité des gènes.

<sup>6</sup> L'usage des documents-brevets comme indicateur de l'activité technologique présente en effet quelques biais (Griliches, 1979 ; Richard, 1998). De nombreuses innovations ne résultent pas d'une invention brevetée et on compte de nombreux brevets qui sont attachés à une invention dont la valeur technologique et économique est quasiment nulle, très peu ont une grande valeur et enfin, beaucoup de brevets n'ont jamais conduit à une innovation. De plus, au regard de l'exigence de nouveauté, des inventions ou innovations mineures peuvent ne pas être brevetées. Par ailleurs, techniquement, toutes les inventions ne sont pas brevetables, cela renvoie notamment aux discussions sur la brevetabilité du vivant et des logiciels. Ou alors certaines inventions brevetables sont soit conservées en tant que secrets, soit placées dans le domaine public au moyen d'une publication défensive destinée à empêcher tous les tiers d'obtenir un brevet sur ces inventions. En outre, le coût lié au dépôt et au maintien du brevet peut constituer un obstacle, notamment pour les petites entreprises.

<sup>7</sup> Les entreprises qui exploitent les brevets du CNRS lui versent des revenus proportionnels au chiffre d'affaires tiré de ces licences.

Les diverses informations disponibles sur les brevets demandés par le CNRS ont été collectées via le serveur *esp@cenet*, où j'ai eu accès à 2 838 brevets correspondant aux demandes effectués par le CNRS auprès de divers offices de propriété intellectuelle (nationaux, régionaux et international), entre 1995 et 2005, ma période d'analyse. Ont ainsi été collectées dans les données bibliographiques<sup>8</sup> : le numéro de brevet, le ou les demandeur(s), la classification internationale des brevets (CIB), la date de publication, le ou les inventeur(s). Une fois ces informations recueillies, s'en est suivi un long travail de codification afin de créer plusieurs variables à partir de ces données. Plus précisément, de chaque donnée propre à un brevet ont été extraites diverses informations permettant la création d'un certain nombre de variables. Dans la mesure où il n'existe pas de base de données reprenant ces informations bibliographiques, j'ai donc dû procéder à leur propre recensement. Vingt-et-une variables ont ainsi été créées sur la base des données bibliographiques recueillies et à partir desquelles j'ai procédé à diverses analyses qui m'ont permis de mettre en évidence certaines caractéristiques inhérentes à « l'environnement-brevet » (Table 1).

Table 1 : Variables créées à partir des données bibliographiques des brevets récoltées

Information source	Variables créées	Signification
CIB	BREVSCLASS	Ensemble des CIB attribuées à la demande de brevet
	BREVCLASS	CIB (limitée au niveau de la classe – 1 lettre et 2 chiffres)
	BREVDOM	Domaine(s) sur lequel porte la demande de brevet
Numéro de brevet	BREVNUM	Numéro de brevet
	BREVPAYS	Pays ou zone où le brevet a été publié
	BREVORI	Brevet international ou national
Date de publication	ANNEE	Année où le brevet a été publié
Inventeur	INVPAYS	Pays d'origine de l'inventeur
	INVPAYSCOD	Origine nationale ou internationale de l'inventeur
Demandeur	DEMNUM	Nom des demandeurs du brevet
	DEMNUMHI	Nom des demandeurs du brevet, hors inventeur
	INV	Présence ou non d'inventeur parmi les demandeurs
	ENT	Présence ou non d'entreprise parmi les demandeurs
	UNIV	Présence ou non d'université parmi les demandeurs
	DEMCOD	Code de la demande de brevet spécifiant le statut du ou des demandeur(s)
	DEMCODHI	Code de la demande de brevet spécifiant le statut du ou des demandeur(s) (hors inventeur(s))
	DEMRES	Code simplifié de la demande de brevet spécifiant le statut du ou des demandeur(s) (hors inventeur(s))
	DEMPAYS	Pays d'origine des demandeurs
	DEMPAYSCOD	Origine française ou étrangère des demandeurs du brevet
	DEMPAYSHI	Pays d'origine des demandeurs (hors inventeur)
	DEMPAYCODHI	Origine française ou étrangère des demandeurs du brevet (hors inventeur)

L'analyse de ces données a permis de rendre compte des couvertures géographiques et technologiques de ces brevets, mais aussi des collaborations développées par le CNRS avec des acteurs divers

<sup>8</sup> Pour chacun de ces brevets, j'ai pu disposer de diverses informations, sachant que tous les brevets ne sont pas entièrement renseignés. En effet, *esp@cenet* fonctionne avec certaines limites, comme le fait qu'il manque à certains documents-brevets, l'abrégé ou le titre en anglais, la classification européenne, etc. Il est également impossible d'afficher le document en entier ou d'imprimer toutes les pages à la fois. En outre, cette base ne disposant pas d'outil d'analyse statistique, il a été nécessaire de collecter les informations une à une et de construire la base de données au fur et à mesure du recueil d'information.

(entreprises, autres institutions scientifiques, structures de valorisation, etc.). Elle a également permis de rendre compte de leurs évolutions par rapport à cette transformation des relations science industrie. Plus techniquement, j'ai fait appel à des outils d'analyse statistique descriptive, d'analyse de données textuelles (des analyses de contingence) et des outils d'analyse et de visualisation des réseaux sociaux pour apprécier plus en détail ces évolutions. Les figures suivantes illustrent quelques-uns des résultats émanant de cette étude. Dans la figure 1, les brevets Total incluent les Brevets Entreprises. On peut noter les différences de domaines dans lesquels s'inscrivent les brevets entre les deux catégories et entre les périodes. Dans la figure 2, En plus de l'accroissement du nombre de brevets et les principaux domaines dans lesquels sont inscrits les brevets, on peut noter l'accroissement des liens entre les domaines.

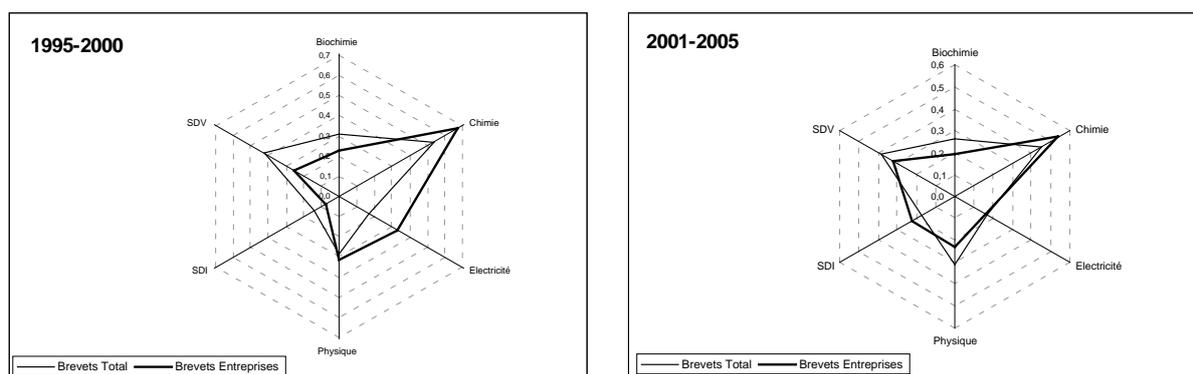


Figure 1 : Comparaison des domaines couverts par les brevets demandés ou non par une entreprise

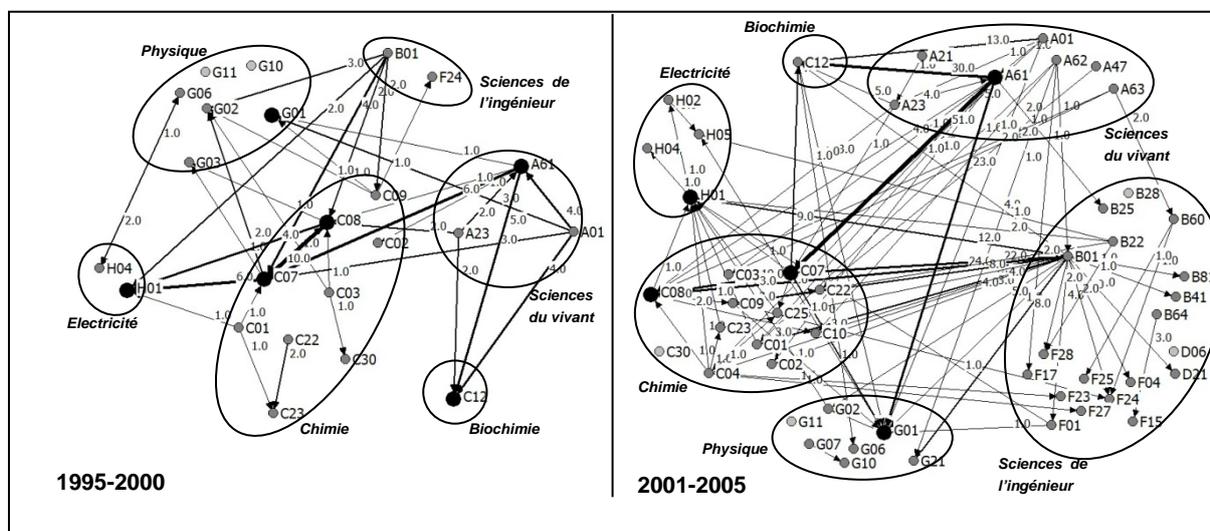


Figure 2 : Les réseaux technologiques dans les brevets CNRS/Entreprises entre 1995 et 2005

Puis, j'ai complété cette étude des co-demandes de brevets impliquant des entreprises par une caractérisation plus précise de ces dernières afin de déterminer quel type d'entreprises développaient des collaborations avec le CNRS et à quels domaines d'activités elles appartenaient. Ces deux premières analyses à partir des brevets demandés par le CNRS ont révélé des thématiques technologiques différentes lorsque des entreprises étaient impliquées dans les dépôts et dans les recherches de l'organisme public. Ce résultat était important car il posait le problème du risque pour la recherche d'être « priorisée » en vue de répondre à des objectifs plus économiques. En effet, diverses

interrogations surviennent en retour dans la sphère académique, comme celle de la conséquence de la participation des entreprises dans les décisions de sélections des trajectoires de recherche ou encore de celle de déterminer au détriment de quel système de recherche, la production partenariale des connaissances scientifiques doit se faire. Ces craintes sont révélatrices de la distance qui sépare encore ces deux mondes, entre leurs priorités, leurs objectifs, leurs modes de fonctionnement. Ce problème de coordination des acteurs de la recherche est d'autant plus complexe que d'autres acteurs sont de plus en plus impliqués et constituent des réseaux plus denses. En effet, des associations de citoyens, des praticiens et des cliniciens dans le cadre des sciences du vivant par exemple s'insèrent dans le système de production des savoirs. Il en résulte que la question de l'organisation des activités scientifiques est également à replacer dans ce contexte élargi.

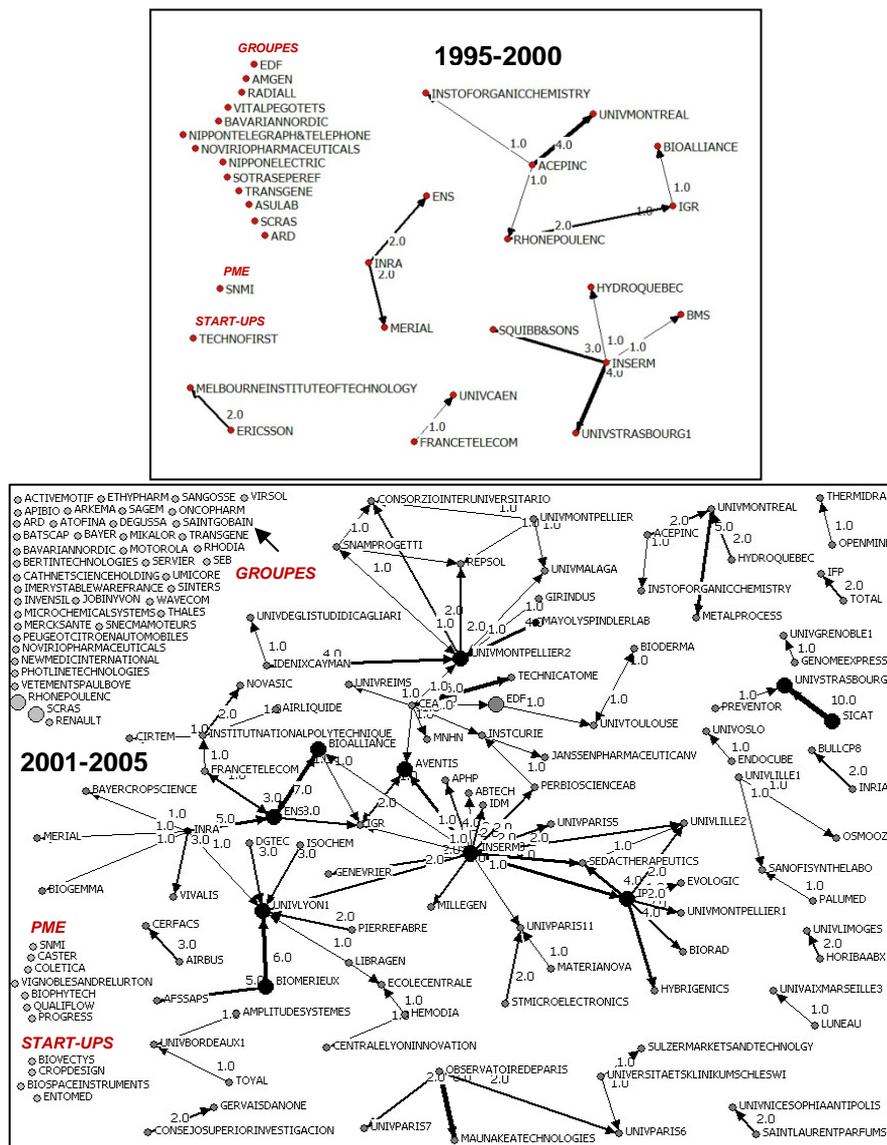


Figure 3 : Les collaborations dans les co-demandes de brevets CNRS/Entreprises

Entre autres résultats, outre l'importance du domaine des sciences du vivant et le recours à des connaissances multidisciplinaires, cette analyse a mis en évidence l'implication accrue, au côté du CNRS, des universités dans cette problématique de « marchandisation » des connaissances scientifiques et surtout des entreprises. En effet, les firmes apparaissent de manière croissante sur la

période dans des collaborations de recherche avec le CNRS et dans ses actions de valorisation économique (Figure 3). Même si les entreprises partenaires sont principalement des groupes, on note la présence accrue des petites entreprises et surtout des start-ups académiques dans les co-demandes de brevets du CNRS.

L'analyse opérée sur les données bibliographiques des brevets co-demandés par les entreprises et sur les firmes elles-mêmes, met en évidence des caractéristiques spécifiques dans le cas des start-ups dont les collaborations avec le CNRS révèlent des pratiques différentes de la recherche mise en œuvre conjointement. Notamment, elle a révélé des enjeux de proximité entre ces start-ups et des institutions scientifiques, en l'occurrence des universités, partenaires dans ces demandes de brevets, faisant écho au caractère localisé des connaissances scientifiques. Ces relations de proximité mettent en scène des acteurs également impliqués dans des Génopoles dont la raison d'être est la création de synergie entre les recherches académique et industrielle et l'émergence de start-ups académiques en biotechnologies.

De manière générale, outre les trajectoires technologiques de recherche suivies, notre analyse des brevets a révélé des caractéristiques différentes quant à l'environnement-brevet lorsque des firmes étaient impliquées dans les recherches du CNRS. Ceci conforte ainsi les craintes exprimées envers une influence que pourraient avoir les entreprises sur les décisions des institutions scientifiques en matière de recherche et de valorisation économique de leurs résultats. Mais notre analyse a également fait ressortir que cette influence émanait aussi des politiques publiques d'innovation. En effet, l'analyse des brevets CNRS/Entreprises a mis en lumière le changement de contexte en matière de soutien à la recherche survenu à partir de la fin des années 1990. L'apparition des start-ups et des PME dans les co-demandes de brevets CNRS reflète la fin d'un mode d'intervention de l'Etat dans la recherche qui était central depuis 1945, à savoir les grands programmes. Ces derniers portaient essentiellement sur les domaines du nucléaire, de l'aéronautique civile, des télécommunications et des technologies de l'information (Mustar, 2006). Or, nous avons trouvé que ce sont dans ces mêmes secteurs que se situent les activités des groupes apparaissant dans les demandes de brevets du CNRS. Cette priorisation des thématiques de recherche semble certes s'expliquer par les rapprochements entre la science et l'industrie mais apparaît également résulter des choix publics en matière de politiques de soutien à la recherche. Nous estimons ainsi qu'en France, le contexte politique demeure au cœur de la problématique des relations science industrie.

De plus, certaines caractéristiques se posent quelques peu en décalage avec mon sentiment de départ. Notamment, les informations contenues dans les demandes de brevets mettent en évidence l'importance nationale dans la gouvernance de la question des relations science industrie. Ces dernières constituent un enjeu domestique nécessitant des réponses adaptées à chaque contexte national. L'influence des actions mises en œuvre par les pouvoirs publics dans la mise en place d'un système de co-production des connaissances scientifiques au sein duquel s'insèrent les relations science industrie est flagrante. Certes, les choix conduisant à de tels rapprochements entre sphères publique et privée résultent des évolutions des contextes dans lesquels évolue chaque acteur concerné, mais ces environnements sont largement déterminés par les choix publics. L'analyse des brevets demandés par le CNRS révèle en effet l'influence des politiques publiques dans les collaborations nouées entre les entreprises et les institutions scientifiques. Si le poids des politiques publiques est également fort dans la mise en œuvre de relations science industrie, la prégnance institutionnelle reste un frein notable à leur développement. Il apparaît de plus que les opportunités financières permises par

le marché du capital risque français sont certes plus limitées, mais le problème est également culturel en ce sens que l'esprit entrepreneurial est moins développé et surtout moins encensé en France qu'aux Etats-Unis. D'une part, il est difficile pour un chercheur de s'improviser entrepreneur. Des problèmes de management et de financements peuvent survenir assez rapidement. D'autre part, cela n'est pas toujours bien perçu et encouragé par la communauté scientifique qui craint de voir des missions de valorisation économique entraver celles qui restent essentielles pour le système de recherche académique, à savoir la recherche fondamentale et l'enseignement. De la même manière, dans ce contexte, il apparaît que les start-ups académiques rencontraient (voire rencontrent toujours) des difficultés à se développer, phénomène lui aussi lié aux particularismes nationaux et aux différences culturelles. Le rôle longtemps joué par la politique française des grands programmes et la participation de grands groupes à des projets de recherche aux côtés d'institutions scientifiques a caractérisé le particularisme français, ce qui conduit à une faible importance de l'entrepreneuriat dans le système de recherche français. On retrouve cette idée dans l'analyse des brevets demandés par le CNRS qui révèle l'influence des politiques publiques dans les collaborations nouées entre les entreprises et les institutions scientifiques.

Si le poids des politiques publiques est également fort dans la mise en œuvre de pôles d'excellence, comme les Génomies, qui se veulent à l'image des parcs scientifiques américains, la prégnance institutionnelle reste un frein notable à leur développement. Plus précisément, le système français de recherche a ceci de spécifique qu'il repose sur une organisation tripartite où co-existent et interagissent des universités, des grandes écoles et des organismes de recherche. Bien que leurs missions respectives recouvrent en grande partie des activités similaires<sup>9</sup>, d'autant plus que les différences s'estompent entre d'une part l'activité des laboratoires du CNRS et des universités et d'autre part celles des autres EPST (Joly, Mangematin, 1996), ces institutions présentent des formes et des modalités de fonctionnement distinctes. Ainsi, autant l'analyse des demandes de brevets du CNRS a mis en exergue cette interpénétration croissante de leur activité, autant l'étude de l'impact de la politique des Génomies a révélé les difficultés de coordination et de mutualisation liées à ces formes institutionnelles distinctes. Plus précisément, l'analyse des collaborations de recherche du CNRS via l'étude des co-demandeurs des brevets déposés par ce dernier a révélé la participation de plusieurs institutions scientifiques au statut différent. On note en effet la présence d'universités, d'organismes de recherche, d'instituts de recherche ou de grandes écoles qui révèle une organisation spécifique à la France de la recherche scientifique. Or, au vu de l'internationalisation croissante de la recherche conduisant à un effet de dispersion des relations science industrie, la visibilité des forces scientifiques s'avère cruciale pour « rester dans la course » et attirer des contrats privés de recherche. Ainsi, même si les ressources académiques françaises sont réputées pour former une élite scientifique et technique de bon niveau, la co-existence et l'interpénétration (comme les UMR) des institutions rendent faible, voire nulle cette visibilité, notamment à l'étranger. D'ailleurs, divers efforts pour gagner en visibilité internationale et en masse critique ont été mis en œuvre ces dernières années, notamment par certaines grandes écoles, même si elles ont fini par avorter. On citera l'exemple des Ecoles des Mines et des Ponts et Chaussées qui ont cherché à fusionner afin de percer sur le plan international (Legait, 2003). Cette organisation particulière du système de recherche français induit également des difficultés de

---

<sup>9</sup> Traditionnellement, des activités de recherche pour les universités et les organismes et des activités d'enseignement pour les universités et les grandes écoles (certaines abritant d'ailleurs des laboratoires de recherche)

coordination et de mutualisation qui constituent un frein à la recherche s'agissant par exemple des difficultés d'intégration des différentes normes d'organisation au sein des structures associant plusieurs institutions scientifiques ou encore de gros équipements à « partager » entre différentes équipes de recherche. Concernant ce dernier point, la politique des Génomoles apparaît comme un mécanisme institutionnel de mise en commun de moyen qui s'est exprimé à travers la constitution de plates-formes technologiques. Pour autant, de gros efforts de coordination doivent être déployés mais la lourdeur du système et le fait que chacun « campe » sur ses positions n'arrangent pas le problème et ne se prêtent pas à l'arranger. Les grandes frontières entre universités, grandes écoles et organismes de recherche sont toujours en place, ce qui rend d'autant plus difficile les relations avec les entreprises qui peuvent se « perdre » dans ce paysage scientifique.

Ainsi, l'analyse des données bibliographiques des brevets demandés par le CNRS entre 1995 et 2005 m'a permis d'explorer une des facettes du système de co-production des connaissances scientifiques qui mêlent la science et la sphère économique et notamment comment des modes de réalisation de la recherche traditionnellement considérés comme antinomiques pouvaient être liés à travers des brevets. En précisant le contexte dans lequel la recherche conduisant à des démarches de valorisation économique est mise en œuvre par le CNRS, elle a révélé un système plus complexe encore où s'exprimaient certes des interactions réciproques entre différents acteurs, tous considérés alors comme des acteurs économiques (Henderson et Cockburn., 1996), mais aussi des logiques politiques. La co-production des connaissances scientifiques se traduit en effet par une diversité des formes concrètes de la transformation économique de la science. Cette évolution de l'économie de la science met en avant des formes multiples de relations science industrie qui relèvent notamment des contrats de partenariats, des brevets, des brevets co-produits ou encore des créations de start-ups académiques. Comme le suggèrent les résultats de cette analyse, cette recherche semble également être influencée par l'environnement industriel et politique du CNRS et notamment, lorsqu'il est question des start-ups, enjeu fort des problématiques liées aux relations science industrie. Cette analyse des données bibliographiques des brevets du CNRS conforte ainsi l'idée selon laquelle la problématique des relations science industrie s'exprimait à travers les politiques publiques mises en œuvre afin de les encourager, de les inciter et de les soutenir.

Il n'y a pas de « représentation idéale » de relations science industrie, au contraire il est important, pour que la politique mise en place ait un impact, de tenir compte de la réalité de terrain qui est très contrastée suivant les sites. Ainsi, il serait intéressant d'étudier la question d'une gouvernance davantage locale de ces relations science industrie étant données les caractéristiques propres à chaque territoire. La première partie avait en effet révélé les nouvelles missions de développement local assignées aux universités, l'étude des génomoles a quant à elle tout particulièrement mis en exergue le rôle croissant des collectivités territoriales dans cette problématique des relations science industrie. Alors que l'autonomie thématique des institutions scientifiques, à travers l'exemple des brevets CNRS co-demandés par des entreprises, a été remise en cause, cette participation des pouvoirs publics locaux dans le fonctionnement de la recherche scientifique, comme celle des entreprises, pose également la question de leur impact sur les stratégies mises en œuvre par les institutions scientifiques, d'autant plus que « ces ouvertures ne sont pas de simples « mécénats », elles engagent les laboratoires dans des partenariats souvent durables et des trajectoires difficilement réversibles » (Larédo et Mustar, 2004,

p.109). Le problème soulevé tant par l'analyse des brevets co-demandés par des entreprises que par celle des génopoles consiste en ce que l'accès à des ressources externes pourrait induire des risques de déviance quant aux choix de trajectoires de recherche à suivre. En effet, la volonté ou le besoin des institutions scientifiques d'accroître leurs sources privées de financement peut conduire ces dernières à privilégier les travaux de recherche à portée plus appliquée afin d'attirer des entreprises ou des associations avec qui elles pourraient nouer des partenariats de recherche ou recevoir des subventions. Ces choix d'une recherche davantage appliquée pourraient également répondre à la pression exercée par les décideurs publics pour une valorisation accrue des connaissances scientifiques et des retours sur investissements plus importants. Ceci est conforté par l'un des résultats de l'analyse des demandes de brevets CNRS qui a révélé la participation d'acteurs connexes aux activités de recherche, à savoir des agences et des cellules de valorisation. Ces dernières s'insèrent souvent dans des logiques de développement de synergie liée à la proximité, à l'émergence de start-ups, à la sensibilisation à la propriété intellectuelle. La mise à contribution d'acteurs plus ou moins en marge du système de recherche mais directement impliqués par ses résultats, comme les médecins, les associations de citoyens, les cliniciens, s'exprime par une pression que ceux-ci exercent pour être impliqués dans les recherches mais aussi pour en orienter les choix de trajectoires. Pour autant, il est important de souligner que même si l'« intrusion » de ces acteurs dans la sphère académique met en avant les changements dans la manière dont la recherche est pratiquée et dans les mentalités des chercheurs, ces derniers restent encore fortement ancrés dans leurs habitudes de fonctionnement propres et chères à la communauté scientifique ce qui peut également constituer un frein au développement de partenariats avec des entreprises.

De la même manière, la création des start-ups, ainsi que leur développement (pérenne), sont freinés par les lacunes managériales des chercheurs. Outre des problèmes récurrents de financements, passée cette « traversée du désert », ces chercheurs-entrepreneurs doivent appréhender les obligations et les contraintes industrielles dont, bien souvent, ils n'ont pas conscience. La politique des Génopoles avait comme mission, inscrite dans un de ses trois volets, de favoriser l'émergence de start-ups académiques en sciences du vivant, les résultats apparaissent plus que limités dans ce domaine. En dehors d'Evry, peu de Génopoles peuvent se prévaloir d'avoir abouti à des spin-offs académiques et pour les sites qui en comptent et abritent un certain nombre, la politique des Génopoles a souvent été un complément à des initiatives déjà enclenchées. Quoi qu'il en soit, en dépit de l'impulsion qu'a tenté de donner le gouvernement à l'émergence des start-ups académiques, à travers la politique des Génopoles, il est difficile pour un chercheur de « s'improviser » entrepreneur et des efforts doivent encore être déployés afin de pallier ces lacunes, le chercheur-entrepreneur devant en effet rassembler les fonds à investir et donc trouver des investisseurs, prévoir les dépenses et les rentrées d'argent, programmer l'activité de l'entreprise pour les années à venir, établir un business plan, s'acquitter des obligations comptables inhérentes au fonctionnement de l'entreprise, etc. En d'autres termes, c'est une véritable « mutation culturelle » pour le chercheur qui se lance dans l'aventure entrepreneuriale et, à ce titre, la création d'entreprise ne peut en aucun cas être l'aboutissement des efforts solitaires d'un chercheur-fondateur (Europa, 2002).

En tout état de cause, un point central de cette étude résidait dans le fait que des obstacles culturels et organisationnels demeurent en France entre les deux mondes que sont le milieu académique et la sphère industrielle. Le système à la française de co-production des connaissances scientifiques et de valorisation économique des résultats et surtout ses particularismes sont à considérer afin de permettre

un accroissement des retombées socio-économiques des recherches académiques et donc le développement d'un système de co-production des connaissances scientifiques sans mettre en péril les systèmes en place. Cela ne peut se résumer à un suivisme de modèles, aussi réussis soient-ils. Il est en outre important de souligner combien les contextes dans lesquels évoluent ces deux mondes ont été bouleversés, les amenant à envisager des rapprochements et à trouver des compromis pour développer une recherche partenariale. Le système de co-production des connaissances scientifiques ainsi formé répond alors davantage à un modèle en réseau, rejoignant en ce sens la conception de Callon (1991a,b) pour qui l'innovation est le fruit d'un ensemble d'interactions entre divers acteurs qui peuvent être des entreprises, des laboratoires académiques, les pouvoirs publics, les financiers, les utilisateurs. Nous avons alors montré que ces interactions prennent elles-mêmes diverses formes mais surtout conduisent à la production d'un output scientifique qui ne répond plus systématiquement à une logique de libre diffusion et qui, au contraire, peut se voir « marchandisé ». La vision des connaissances scientifiques que l'on assimile à des biens publics s'est en effet vue remise en cause par les théoriciens de la science, dont certains expriment des craintes vis-à-vis d'une priorisation des thématiques de recherche suivies, craintes largement partagées par la communauté scientifique qui redoute de perdre son autonomie, son indépendance et sa liberté de rechercher. A cet égard, on peut citer le récent prix Nobel de physique 2007, Albert Fert qui plaide en faveur d'une recherche libre dans un entretien au journal *Le Monde* (25 octobre 2007). Pour lui, « il faut laisser la recherche fondamentale se dérouler, les chercheurs suivre leurs idées, en zigzaguant, pour déboucher sur des découvertes et ensuite des applications. Je n'ai pas démarré mes travaux en me disant que j'allais augmenter la capacité de stockage des disques durs. Le paysage final n'est jamais visible du point de départ ». Une finalité stricte ne doit ainsi pas être imposée à la recherche dont le parcours n'est jamais linéaire. La science nécessite des financements publics, non pas parce que les connaissances scientifiques sont des biens publics, mais parce que cela permet un nécessaire degré de variété et de flexibilité (Callon, 1994 ; Joly et Mangematin, 1996). De la même manière, cette conception de la science, pouvant être « ouverte » ou partenariale, conforte notre vision selon laquelle les caractéristiques inhérentes aux connaissances scientifiques ne lui sont pas intrinsèques mais plutôt institutionnelles. En effet, nous avons montré qu'elles consistent en des biens publics, non pas au regard de leur nature mais parce que c'est la fonction qui leur est assignée par le monde académique. A partir du moment où des logiques commerciales leur sont attribuées, elles deviennent des biens (partiellement) privés comme si elles avaient été découvertes par des entreprises sous des logiques entrepreneuriales. Nous considérons ainsi que la justification d'un soutien public ne réside pas dans les caractéristiques intrinsèques des connaissances produites, mais par celles du système dans lequel elles sont produites. Ce sont les institutions au sein desquelles elles sont développées qui dictent leurs normes et leur diffusion, suivant les fonctions qu'elles leur donnent et sous réserve d'une éthique et d'une priorité donnée au bien-être social (question de la brevetabilité du vivant par exemple).

## **II. LES PROJETS DE RECHERCHE**

En matière de production scientifique, en dehors de ma thèse à proprement parler, j'ai participé à des conférences et workshops et j'ai surtout participé à plusieurs projets de recherche sous la responsabilité de mon directeur de thèse, Michel Quéré. Ces contributions ont autant structuré ma période de doctorat que mon travail de recherche. Elles m'ont permis d'acquérir plus d'expériences en matière de recherche et d'échanger davantage avec des chercheurs de différents laboratoires. A l'issue

de mon doctorat, j'ai participé à un autre projet mené par le GREDEG, sous la direction de Joël-Thomas Ravix, sur les écosystèmes d'affaires et les plateformes collaboratives innovantes.

### **A. Projet OEM « Les PME et l'exportation : la nécessité d'une politique industrielle horizontale » - 2008**

En 2008, le GREDEG fut en charge, sous la responsabilité scientifique de Joël-Thomas Ravix, pour le compte du GIMELEC (Groupement des Industries de l'Équipement Électrique, du Contrôle-Commande et des Services Associés), d'un projet de recherche sur les écosystèmes d'affaires et les nécessaires supports pour le développement à l'international des PME équipementières (OEM/Original Equipment Manufacturer ou fabricant d'équipement d'origine). J'ai participé à ce projet en collaboration avec Petra Bleuel, doctorante au GREDEG. Il s'agissait ainsi principalement de développer un modèle de soutien des PME à l'export prenant en compte les spécificités françaises tout en le comparant aux modèles qui ont fait leurs preuves dans des pays comme l'Allemagne ou l'Italie. Les résultats de cette étude ont fait l'objet d'un rapport soumis au ministère de l'industrie et de l'économie et du commerce extérieur afin d'induire une nouvelle dynamique de développement à l'export et de croissance des PME, telles que le suggéraient les propositions faites en 2008 par la FIEEC (Fédération des Industries Électriques, Électroniques et de Communication).

Plus précisément, l'objet de ce projet était d'étudier la pertinence de la notion d'écosystème d'affaires pour définir une nouvelle modalité de politique industrielle horizontale de soutien des PME à l'exportation. La notion d'écosystème d'affaires se différencie de celle de cluster puisqu'elle désigne une coalition hétérogène d'entreprises relevant de secteurs différents et formant une communauté stratégique d'intérêts structurée en réseau autour d'une entreprise leader. Dans ce type de réseau les entreprises entretiennent des relations de coopération et de concurrence sans contraintes d'ancrage territorial ni d'appartenance sectorielle. L'idée est d'appliquer cette notion d'écosystème d'affaires à la constitution de réseaux orientés vers l'exportation s'appuyant sur l'expérience internationale de grandes entreprises et offrant des solutions pour les PME. De tels réseaux peuvent prendre la forme de plates-formes collaboratives virtuelles.

D'un budget de 28 221 euros (HT) et d'une durée de 8 mois, l'étude proposée s'est structurée en deux étapes.

1<sup>ère</sup> étape :

- Analyse de la place des PME dans le commerce extérieur.
- Etude de l'effet des mesures actuelles de politique industrielle.
- Approfondissement du concept d'écosystème d'affaires et de son application au développement des PME à l'exportation.
- Etude d'une possibilité d'application au cas des PME de la mécanique (constitution d'un échantillon et élaboration d'un questionnaire).
- Remise d'un rapport intermédiaire.

2<sup>ème</sup> étape :

- Etude d'une possibilité d'application au cas des PME de la mécanique (exploitation des résultats de l'enquête).
- Analyse comparative de différentes expériences similaires dans différents pays européens et plus particulièrement en Italie (districts industriels) et en Allemagne (Kompetenznetze).

- Développement du principe de plate-forme collaborative virtuelle.
- Remise du rapport final et rédaction d'un livre blanc.

**Rapport intermédiaire** : Joël-Thomas RAVIX, Petra BLEUEL, Sabine ROCHOW et Sandrine SELOSSE, PROJET OEM, Rapport intermédiaire, 2009, 75 pages

**Rapport final** : Joël-Thomas RAVIX, Petra BLEUEL et Sandrine SELOSSE, PROJET OEM, Rapport final, 2009, 135 pages.

**Livre blanc** : Joël-Thomas RAVIX, Petra BLEUEL et Sandrine SELOSSE, Les PME et l'exportation : la nécessité d'une politique industrielle horizontale, 2009, 37 pages.

## **B. Programme « Sciences Bio-médicales, Santé et Société » 2003-2006**

De 2003 à 2006, j'ai participé à un projet de recherche financé par le CNRS, l'INSERM et le Ministère de la Recherche dans le cadre du Programme « Sciences Bio-médicales, Santé et Société » (Numéro de Notification : 03N72/0010). Ce projet dirigé par Michel Quéré portait sur **Les Incidences Economiques de la Politique Génopoles en France**. Dans le cadre de ce projet j'ai réalisé des études de cas sur les différents sites Génopoles (8 au moment du projet). J'ai ainsi construit des bases de données et en ai réalisé le traitement statistique. J'ai ensuite complété cette analyse par la réalisation d'entretiens semi-directifs. Enfin, j'ai participé à la rédaction et à la présentation des rapports de recherche.

Ce travail de recherche visait à discuter l'incidence économique de la politique de labellisation des génopoles dans le contexte français. Ce dernier connaissait depuis deux décennies de profonds bouleversements en matière d'organisation des relations science industrie et du rôle économique des chercheurs académiques en particulier. Ces bouleversements, à la fois génériques et spécifiques, participaient d'une transformation en profondeur du système de recherche publique qui trouvait aussi des formes différenciées selon les disciplines concernées. Les sciences du vivant représentaient alors un ensemble disciplinaire doté de fortes attentes économiques de la part des autorités publiques car perçues comme le véhicule d'opportunités économiques majeures par l'innovation et la découverte de nouveaux produits (traitements thérapeutiques), ou de services (diagnostics) dans le domaine de la santé. Elles sont encore aujourd'hui perçues comme le véhicule de technologies génériques pouvant trouver des champs d'application dans des domaines d'activités connexes et variés (santé animale, agro-alimentaire, environnement, etc.). L'un des traits les plus caractéristiques de ce label génopoles est sa plasticité au sens où, faisant face à des conditions initiales très différenciées du point de vue de l'infrastructure scientifique ou du milieu industriel pré-existant au label, chaque site labellisé génopole s'est approprié le concept de manière différenciée, ce qui réduit la portée normative de tout jugement ou de recommandation en matière de politique publique assortie à la vie de ce label. Il reste que des similarités structurelles existent, notamment le fait que la concrétisation première de ce label reste la mise en place de plateformes technologiques qui partagent les mêmes objectifs tout en se différenciant, parfois fortement, en matière de contenu, de fonctionnement et de gouvernance.

Les génopoles étant le produit d'un appel d'offre du Ministère, cela posait un problème de pérennité au sens où après avoir lancé le mouvement, le Ministère ne nous paraissait pas vouloir le soutenir, tout au moins à la hauteur des ambitions initiales. Si l'on prend comme illustration les plateformes technologiques, il est évident que ces dernières ne pouvaient pas faire l'objet d'un maintien en l'état. Il

fallait soit procéder à un tri pour identifier quelles plateformes technologiques pouvaient continuer à bénéficier d'un financement du Ministère au détriment de quelles autres, soit trouver quelqu'un pour prendre le relais dans la gestion de ces initiatives. Que ce soit le CNRS, le CEA, l'INSERM, l'INRA ou les universités, aucun de ces organismes n'était alors capable de prendre seul le relais de l'Etat et d'assurer la pérennité de ces plateformes technologiques. Cette interrogation fut renforcée par le lancement d'une multitude d'autres initiatives, soit dans le domaine de la recherche, soit dans le domaine industriel, et plus ou moins proches des attendus des génopoles (comme les cancéropoles, les pôles de recherche et d'enseignement supérieur ou encore les pôles de compétitivité). Ce travail a également révélé des ambiguïtés de l'action publique locale en matière de relations science industrie qui relèvent aussi des différences officielles de prérogatives entre les acteurs publics impliqués, effectivement ou potentiellement, dans ces génopoles : les acteurs centraux privilégiant de facto une orientation de nature scientifique (enjeux de mutualisation inter-organismes) là où les acteurs publics locaux (régionaux, départementaux ou communaux) voient plutôt l'orientation économique d'une telle initiative. Dans certains cas, les financements amenés par les collectivités territoriales locales ont été considérables (à l'exemple d'Evry), il est donc logique qu'existent de fortes attentes sur le label en matière d'impact sur le potentiel économique local et le volume d'emplois assortis. Pour autant, une ambiguïté naturelle est prégnante, qui réside dans le fait que les collectivités territoriales n'ont pas vocation à soutenir la recherche et à intervenir de façon structurante en la matière. Le devenir des relations science industrie passe en conséquence par l'affirmation de partenariats mieux établis entre l'Etat et les collectivités territoriales pour lesquels les contrats de plan Etat-Région n'épuisent pas le sujet. Enfin des échanges menés au sein des génopoles est ressortie l'attente d'une meilleure visibilité et clarté dans les affirmations des choix publics. Dans un nombre important de cas rencontrés, les acteurs se démêlent dans des contradictions qui pèsent dans la gestion du quotidien et qui relèvent à la fois d'une dimension horizontale (les relations trans-organismes locales) et verticales (l'instabilité des choix publics et les difficultés d'interfaces entre niveau local/régional et niveau central/national). L'affirmation et la stabilisation d'orientations de politiques publiques semble être une condition nécessaire pour obtenir des résultats économiques plus tangibles à partir des différentes initiatives en cours. En ce sens, les génopoles ne sont apparus que comme une illustration d'un problème plus général de positionnement de l'action publique en matière d'opportunités économiques retirées du monde économique. Au demeurant, cette question soulève aussi l'articulation entre politique nationale et politique européenne dans la mesure où un certain nombre d'enjeux futurs pour ces domaines scientifiques relèvent d'une problématique qui dépasse largement le cadre national.

**Rapport final de recherche :** QUERE Michel, SELOSSE Sandrine, 2006, Les Incidences Economiques de la Politique Génopoles en France, Programme « Sciences Bio-médicales, Santé et Société » (N° 03N72/0010, CNRS (SHS-SDV)-INSERM-MiRe DREES, Rapport final de recherche, 80 pages.

**Séminaire de présentation :** SELOSSE Sandrine et QUERE Michel, Etude d'impact économique de la politique Génopoles en France, 15 et 16 novembre 2005, Cernay-la-Ville.

**Conférence :** QUERE Michel et SELOSSE Sandrine, The Organisation of Science-Industry Relationships in the Realm of the Life Science Industry: Learning from the French Genopole Policy, ELSIS International Conference, Edinburgh, 23-25 February 2005

### **C. Projet européen TELL “Technological Knowledge and Localised Learning: What Perspectives for a European Policy ?” – 2002-2004**

De 2002 à 2004, j’ai participé à un projet de recherche européen sous la direction de Michel Quéré qui coordonnait la participation du GREDEG (ex-IDEFI). Ce projet européen était quant à lui coordonné par Cristiano Antonelli, du Laboratorio di Economia dell’Innovazione “Franco Momigliano” et de la Fondazione Rosselli à Turin. Les autres partenaires du projet étaient l’University of Edinburgh – Japanese European Technology Studies au Royaume-Uni, l’University of Lisbon – Fundação Da Universidade de Lisboa au Portugal, l’Université Libre de Bruxelles en Belgique, Science and Policy Research Unit du Royaume-Uni, Instituto de Ciencias Sociais et l’Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial tous deux au Portugal.

L’objet de ce projet était dans un premier temps de réaliser un état des lieux du secteur des sciences de la vie et des biotechnologies en Europe. Dans un second temps, il visait à apporter un éclairage de la situation en France à travers l’exemple de la politique française des Génomies telle qu’elle a été mise en œuvre dans la région Provence-Alpes-Côte d’Azur (PACA). Plus précisément, ce projet visait tout d’abord à fournir un cadre pour discuter des caractéristiques spécifiques de la production, de l’accumulation et de la diffusion des connaissances dans le contexte de l’industrie des sciences de la vie. Celle-ci est quelque peu spécifique à tout autre secteur et, par conséquent, présente des mécanismes de régulation très particuliers. Cela tient évidemment, d’une part, au caractère scientifique de l’industrie mais d’autre part, de la spécificité des « produits » au sein de l’industrie qui obligent à intégrer les préférences des consommateurs et les considérations éthiques. Pour décrire la réglementation spécifique de la production, de l’accumulation et de la diffusion des connaissances qui découle de l’industrie des sciences de la vie, nous avons opéré une analyse historique de cette industrie nous permettant alors d’introduire les principaux facteurs impliqués dans le stade actuel de son développement. Ensuite nous avons procédé à une analyse de l’industrie des biotechnologies et fourni un aperçu des contextes américains et européens en nous focalisant notamment sur la répartition géographique, la recherche et le développement et sur des indicateurs économiques, scientifiques et technologiques. Enfin, nous avons traité les mécanismes de production, d’accumulation et de diffusion des connaissances dans l’industrie des sciences de la vie en introduisant des considérations en termes d’organisation industrielle à travers ses principaux acteurs et leurs comportements.

Tout d’abord, cette recherche a permis de démontrer que l’industrie des sciences de la vie est peut-être l’un des exemples les plus impressionnants de la difficulté de représenter la dynamique de l’innovation, car l’ensemble des caractéristiques qui influencent la dynamique de cette industrie est énorme. L’identification des acteurs clés de la dynamique de l’innovation témoigne de cette complexité : les grandes entreprises diversifiées, les entreprises plus petites dédiées aux biotechnologies, les institutions publiques de recherche, les pouvoirs publics et les associations de consommateurs. Les diverses façons dont ces acteurs se croisent sont à la base de la grande complexité de l’organisation industrielle dans les sciences du vivant. Cette complexité résulte de l’importante dépendance entre les facteurs internes aux entreprises et les facteurs liés à leur environnement (principalement la science, les pouvoirs publics et les consommateurs) et elle induit quelques caractéristiques qui semblent spécifiques à l’industrie des sciences de la vie. D’une part, au lieu de se propager de manière homogène, la localisation des acteurs au sein de cette industrie est très concentrée autour des ressources scientifiques. Cela souligne le rôle du savoir localisé en ce que les interactions locales

semblent influencer de manière significative la dynamique de l'innovation. Cependant, la pertinence des modèles localisés pour cette industrie doit être contrebalancée par l'importance de plus en plus évidente des stratégies internationales. Ici, par exemple, les tendances tendant à une internationalisation de la stratégie de brevet pour les entreprises sont également évidentes et montrent comment des modèles localisés doivent être considérés au regard de la mondialisation des marchés liés ou attendus. Si les sources de l'innovation doivent être ancrées en raison de la complexité antérieure, cette industrie est aussi l'une des rares dans lesquelles la dynamique des connaissances se diffuse rapidement à l'échelle mondiale, en raison de son caractère scientifique. Enfin, en ce qui concerne ses caractéristiques, il faut aussi insister sur les modèles contrastés des pays européens au regard du contexte américain qui est face aux mêmes ensembles de contraintes. Non seulement les ressources scientifiques et la recherche fondamentale sont en jeu, mais la préoccupation de la demande est également très active : les patients veulent avoir un rôle de plus en plus important et un contrôle croissant. La définition du produit est en outre sous l'examen de questions éthiques et les pouvoirs publics veulent contrôler les phases expérimentales, les protocoles de tests cliniques, ainsi que plus largement offrir des conseils juridiques pour la dynamique de l'innovation. De cette complexité des contraintes résulte la complexité de l'organisation industrielle qui atteste de la difficulté de gérer la dynamique du savoir et de l'innovation dans ces domaines. Les grandes entreprises se confrontent aux problèmes d'intégration avec l'absorption des connaissances requises, alors que les entreprises dédiées aux biotechnologies font face à des problèmes de coordination pour articuler des ressources complémentaires et passer des opportunités spécialisées à des opportunités mondialisées.

Pour approfondir la question de l'importance de la dynamique des connaissances, nous nous sommes penchés sur le fonctionnement d'un contexte spécifique, celui de la région PACA qui est l'une des premières régions françaises en ce qui concerne les indicateurs traditionnels utilisés pour les études d'innovation. Parmi d'autres, on peut citer une forte densité de boursiers de recherche publique et d'institutions publiques de recherche, une forte proportion d'activités de services, un haut niveau de capacités scientifiques, etc. Tous ces indicateurs forment un ensemble d'indices permettant d'apprécier la pertinence de ce cas d'étude sur l'analyse de la dynamique des connaissances au niveau régional. En outre, la région PACA est connue pour être très importante en ce qui concerne son potentiel de recherche publique en sciences de la vie. Dans le cadre de cette seconde partie, j'ai réalisé une étude de cas approfondie du Génomole de la région PACA. J'ai ainsi construit une base de données et en ai réalisé le traitement statistique avant de réaliser des entretiens semi directifs auprès de nombreux acteurs impliqués dans le Génomole. Dans un premier temps de l'étude de cas, nous avons trouvé un résultat assez paradoxal, qui est le caractère différencié des deux principales zones de concentration de la recherche et des entreprises (les zones de Marseille et de Nice). Dans la région PACA, l'activité de recherche publique est répartie de manière inégale. Alors que la zone de Marseille concentre les capacités de recherche fondamentale, la zone de Nice (y compris la région de Sophia Antipolis) est plus prégnante en ce qui concerne la recherche appliquée et clinique. Par contre, la plupart des entreprises considérées comme appartenant à l'industrie des sciences de la vie sont situées dans la région de Nice et très peu dans la région de Marseille. Par conséquent, notre recherche a ensuite principalement porté sur la compréhension de ces modèles dualistes et leurs implications pour la caractérisation de la dynamique des connaissances localisées en explorant plus en détail les caractéristiques de la zone niçoise.

Contrairement aux attentes tirées de la discussion analytique et de l'état des lieux de l'industrie des sciences de la vie, nous avons trouvé un ensemble de PME qui semblent fortement déconnectées de l'infrastructure scientifique locale. Ainsi, autant l'importance du savoir localisé est confirmé dans le sens où ces entreprises interagissent avec un grand nombre d'acteurs (autres entreprises, institutions publiques de recherche, universitaires) afin d'élaborer leur base de connaissances, autant la plupart des interactions productives ne sont pas locales (en termes géographiques). Il en résulte que le savoir localisé doit être davantage défini en fonction des environnements productifs (et non géographiques). Par ailleurs, bon nombre des entreprises que nous avons rencontrées développent des niches de marché très spécifiques. La plupart d'entre elles concentrent leurs activités dans des domaines tels que les produits parapharmaceutiques, les cosmétiques ou même la dermatologie, de telle sorte qu'ils ne sont pas directement impliqués dans l'industrie des sciences de la vie (au sens traditionnel). La concentration industrielle dans les Alpes Maritimes est essentiellement due au développement d'activités « périphériques » en ce qui concerne la manière habituelle de définir les activités des sciences de la vie. Cependant, les PME locales basées sur la recherche font face à la concurrence internationale dans ces niches de marché. Bon nombre d'entre elles n'ont pas de concurrents locaux mais agissent isolément localement, car leur pression concurrentielle est principalement due aux entreprises américaines. Elles agissent également dans le monde entier, y compris en ce qui concerne les clients et fournisseurs qui sont pour beaucoup américains et asiatiques. Le manque de liens locaux entre les PME basées sur la recherche et les laboratoires de recherche publics est une bonne occasion de traiter les questions de politique et, en particulier, les politiques de connaissances localisées. Cette étude de cas offre un exemple intéressant d'inadéquation en ce qui concerne les problèmes de connaissance localisés. Les opportunités industrielles découlant du fonctionnement des sciences de la vie dans cette étude dans les Alpes Maritimes sont apparues très faibles, malgré l'identification statistique d'un véritable pôle d'activités dans ces domaines. Dans une certaine mesure, cette étude offre un exemple intéressant de défaillances de coordination, en ce qui concerne la promotion du savoir localisé. Certainement, les conditions initiales comptent comme variable explicative (l'absence de tradition industrielle) mais la faiblesse de la capacité des décideurs locaux à résoudre la désadéquation antérieure entre les PME basées sur la recherche et la recherche publique locale doit également être soulignée. Certes, la situation est très différente en Europe mais l'étude de cas PACA offre à cet égard une illustration intéressante de ce qui devrait être discuté afin d'anticiper les effets localisés des connaissances au niveau régional dans le contexte européen.

### **Rapports de projet :**

IDEFI-CNRS (QUERE Michel, SAVIOTTI Pier Paolo, SELOSSE Sandrine), Université Libre de Bruxelles (MICHEL Jessica, Van POTTELSBERGHE Bruno), 2003, « Life Sciences/biotechnology – State of the Art », Part I of Case Studies Results – Biotechnology, Projet TELL (« Technological Knowledge and Localised Learning : What Perspectives for a European Policy ?»), Contract n°HPSE-CT2001-00051, Project n°: SERD-2000-00115

MICHEL Jessica, QUERE Michel, SELOSSE Sandrine, 2003, « Life sciences/biotechnology study in the Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) region », Part II of Case Studies Results – Biotechnology, Projet TELL (« Technological Knowledge and Localised Learning : What Perspectives for a European Policy ?»)

### **Séminaire de présentation :**

QUÉRÉ Michel, SELOSSE Sandrine, 2004, Localized knowledge and the life sciences industry: some insights from the Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) region, International Conference « The Political Economy of Knowledge – Technological Knowledge and Localized Learning: What Perspectives for a European Policy? », 23-24 April, Turin

QUERE Michel, SELOSSE Sandrine, 2002, Knowledge dynamics in the life science industry: Learning from the French Genopoles policy, Meeting TELL (« Technological Knowledge and Localised Learning : What Perspectives for a European Policy ?»), 29-30 November, Sophia-Antipolis

**Contract n°:** HPSE-CT2001-00051 / **Project n°:** SERD-2000-00115

### **D. Projet « La structuration des réseaux d'entreprises », ORSEU, Villeneuve d'Ascq – 2000-2001**

Au cours de mon année de DEA (Master 2) à l'Université des Sciences et Technologies de Lille 1, j'ai participé à un projet de recherche sous la direction de Jean-Pierre Yonnet qui était alors également mon directeur de mémoire. Ce projet était réalisé pour l'IRES (Institut de Recherche Economique et Sociale) à Paris, et coordonné par Jean-Pierre Yonnet sur le thème des relations inter-entreprises locales dans le secteur du transport transmanche dans le Nord-Pas-de-Calais. Dans le cadre de ce projet, j'ai été amenée à réaliser la recherche bibliographique et à mener des entretiens semi directifs dont j'ai ensuite réalisé l'analyse. Ce projet a constitué une première expérience de recherche. C'est en partie de par cette première expérience que Michel Quéré m'a alors proposé de participer au projet européen TELL pendant mon année de DEA à l'Université de Nice Sophia Antipolis et pendant la thèse qui a suivi.

**Rapport de recherche :** YONNET Jean-Pierre, MINET Stéphane, HETRU Emmanuel, DE BRUYKER-FOSSE Maïté, PORE Sabrina et SELOSSE Sandrine, « La structuration des réseaux d'entreprises », UNSA Éducation, septembre 2004

---

J'ai ainsi soutenu ma thèse en décembre 2007. En mai 2008, je suis entrée au Centre de Mathématiques Appliquées de MINES ParisTech à Sophia Antipolis pour un post-doctorat d'une année dont l'objectif était le montage d'un consortium ou d'une chaire industrielle « Prospective et optimisation » pour le déploiement et le développement d'outils prospectifs centrés sur des outils d'optimisation et d'aide à la décision et dérivés d'une modélisation de type MARKAL/TIMES. A ce moment, j'y ai vu une opportunité de mieux découvrir le fonctionnement d'un de ces autres grands types d'institutions de recherche en France, connaissant un peu plus le modèle universitaire et le CNRS. En outre, l'objectif de création de la Chaire industrielle apparaissait lui aussi comme une contribution à la mise en œuvre d'une forme de relations science industrie et donc comme une application concrète de mon travail de thèse. Pour la suite, je suis tenté de citer le Prix Nobel de Chimie 1977, Ilya Prigogine souligna (Monod, 1990) « j'ai toujours été impressionné par un théorème général qui dit qu'aucun système, quelle que soit sa complexité, n'est à l'abri de transformations liées à l'introduction de nouvelles perspectives et de nouveaux acteurs. Il n'y a pas de fin de l'histoire ».

## CHAPITRE 2 : MON PROJET DE RECHERCHE EN PROSPECTIVE DES POLITIQUES ENERGIE-CLIMAT

En intégrant le Centre de Mathématiques Appliquées de MINES ParisTech en mai 2008, pour contribuer à la création de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable, j'ai adopté la démarche prospective que le CMA, notamment à travers cette Chaire, s'est donné comme vocation de développer et de diffuser afin de faciliter la prise de décision portant sur des questions de choix technologiques et de politiques énergie et climat. En effet, en s'appuyant sur l'ensemble de ses compétences en modélisation, optimisation, mathématiques du contrôle et de la décision, informatique du temps réel, le CMA a développé une expertise pour l'aide à la décision dans le domaine de l'énergie. Son approche prospective est fondée sur des modèles d'optimisation de la famille MARKAL/TIMES développés dans le cadre du programme ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program) de l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie) où le CMA représente la France. Cette association de disciplines fondamentales permet d'envisager des systèmes complexes pour une déclinaison de thèmes qui reflètent de grands défis industriels et de grandes questions de société<sup>10</sup>.

L'énergie et le climat constituent deux thématiques liées au cœur de l'actualité des sociétés. Les questions d'approvisionnement énergétique et de consommation plus efficace de l'énergie, tout comme les politiques climatiques jouissent d'une reconnaissance accrue ces dernières décennies tant dans les débats scientifiques et publics que politiques. De la même manière, dans le cadre de la transition énergétique et du développement durable, de nombreux aspects de l'offre d'énergie et des usages ont changé au cours des dernières décennies, en lien avec l'intégration croissante des marchés énergétiques régionaux. L'Europe par exemple dans sa feuille de route à l'horizon 2050 (Roadmap 2050) a fourni à ses Etats membres un cadre à long terme visant à assurer un approvisionnement sûr en énergie dans un environnement contraint à un coût abordable<sup>11</sup>. Les décisions sont alors déterminées au vu des marchés globaux et des politiques internationales. Afin d'évaluer les mesures politiques et les perspectives des nouvelles technologies de conversion d'énergie et de fournir ses recommandations de politiques, l'analyse fondée sur des modèles prospectifs est largement utilisée. Il existe différents modèles visant à analyser les politiques pertinentes au regard de la transition vers un futur énergétique durable. Les modèles de la famille TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM Systems) et en particulier leur version mondiale ETSAP-TIAM (The TIMES Integrated Assessment Model) et TIAM-FR en font partie et permettent des analyses long terme des systèmes énergétiques. Ce type de modèles, se caractérisant par la modélisation d'un problème d'optimisation, offre la possibilité d'une évaluation intégrée des politiques énergétiques et climatiques, dans une perspective technologique. Ils constituent un outil de prospective long terme permettant, via l'implémentation de différents scénarios, d'analyser les effets de politiques ou d'incitations environnementales ou technologiques, sur le système énergétique d'une région donnée et à un horizon temporel défini.

Dans cette problématique en prospective long terme des questions énergie-climat, ma recherche porte plus précisément sur l'impact global et régional sur les systèmes énergétiques des politiques climatiques prises dans le cadre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements

---

<sup>10</sup> <http://www.cma.mines-paristech.fr/fr>

<sup>11</sup> [https://europa.eu/european-union/topics/energy\\_fr](https://europa.eu/european-union/topics/energy_fr)

climatiques (CCNUCC)<sup>12</sup> ou plus précisément dans le cadre de la Conférence des Parties (CdP)<sup>13</sup> et des politiques qui en découlent. L'analyse des engagements post-Copenhague (COP 15 en 2009) et post-Paris (COP 21 en 2015) participe de cette problématique. En outre, en raison de leur richesse en matière de technologies et de mesures politiques qui peuvent être analysées, ces modèles prospectifs sont caractérisés par un haut niveau de complexité. Afin d'être en mesure de répondre à des questions actuelles et futures de politiques énergétiques pertinentes sur une base scientifique à jour, il est nécessaire d'y apporter une révision régulière et des améliorations continues au niveau des ensembles de données et des structures technologiques du modèle. Les décideurs notamment s'appuient sur l'analyse des scénarios énergétiques à moyen et long terme émanant de ce type de modèles. Aussi, il est crucial d'y apporter un développement et une amélioration continue afin de tenir compte des nouveaux déterminants des demandes énergétiques, des nouvelles caractéristiques technico-économiques ou encore des technologies et énergies du futur (on pourrait citer la question des véhicules électriques, les biocarburants à base de micro-algues, les technologies de valorisation industrielle du carbone, etc.). Une veille réglementaire est également nécessaire et doit être intégrée aux paramètres du modèle, par exemple la question des sites de stockage de CO<sub>2</sub> et leur acceptabilité sociale ou encore les effets sur l'océan du stockage du carbone en océan profond en termes d'acidification. Egalement, comme précédemment précisé, ces outils peuvent fournir des recommandations sur les perspectives des nouvelles technologies dans un système énergétique futur durable compte tenu des contraintes environnementales. Aussi, il est important de suivre et d'intégrer dans le modèle et dans les discussions les enjeux climatiques globaux tout comme les engagements régionaux des Etats en matière de réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre (GES).

Dans ce contexte, mon projet de recherche s'articule en deux volets autour des versions mondiales du modèle TIMES, tous deux étant étroitement liés et complémentaires. Le développement du modèle prospectif, afin d'en assurer la pertinence et la pérennité au fil du temps et de couvrir au mieux la problématique énergie-climat, est la trame transversale et permanente de mon activité de recherche, tout comme l'analyse des politiques climatiques constitue le fil conducteur des choix d'analyse et de développement du modèle. Le premier volet porte sur le développement de l'outil à proprement parler et le second porte sur des investigations de recherche ayant trait aux politiques climatiques et aux choix technologiques en résultant. J'ai ciblé pour le moment les enjeux de déploiement des technologies de capture et de séquestration du carbone et des bioénergies.

## **I. DEVELOPPEMENT DES OUTILS DE MODELISATION PROSPECTIVE**

Fondé en 1976 par l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), l'ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program) constitue une Initiative Technologique Multilatérale, soit plus précisément, un programme collaboratif international visant à analyser les systèmes technologiques énergétiques en compilant de nombreux scénarios de prospective long terme. Se focalisant au tout début du programme sur l'analyse d'outils existants, dès 1978 le générateur de modèle MARKAL (MARKet ALlocation) fut développé et depuis, la communauté d'utilisateurs de ces modèles continue de coordonner des projets communs et d'améliorer les outils, dont les modèles de la famille TIMES, le

---

<sup>12</sup> Dans la suite du document, j'emploierai le sigle anglais UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change* – par souci d'unité de terme dans le texte.

<sup>13</sup> De la même manière, j'emploierai le sigle anglais COP – *Conference of Parties*.

successeur de MARKAL. Ces modèles technico-économiques répondent tous au même paradigme d'optimisation sous programmation linéaire et sont à horizon, échelle et structure variables. Même si l'impulsion a principalement été la crise pétrolière et la volonté d'étudier des alternatives au pétrole, la problématique environnementale a toujours, et ce dès le début, été considérée. Ils sont ainsi généralement utilisés pour construire des scénarios énergie-climat de long terme et discuter des trajectoires nationales ou multi-régionales, multi-périodes, multi-sectoriels, etc.

L'ETSAP représente ainsi aujourd'hui un réseau d'équipes de modélisateurs localisées dans près de soixante-dix pays qui coopèrent pour développer, maintenir et étendre une capacité d'analyse multirégionale aux interfaces Energie/Economie/Environnement/Ingénierie principalement fondée sur la famille de modèles MARKAL/TIMES. Le développement de ces outils a par ailleurs évolué au fil du temps vers la recherche de combinaison d'une approche d'optimisation bottom-up des flux énergétiques et de modélisation macroéconomique top-down (avec notamment TIMES-Macro et TIAM-Macro), d'apprentissage technologique et de modélisation stochastique. L'objectif, in fine, est de renforcer les capacités de modélisation dans le but d'aider les responsables publics et les décideurs à accroître la robustesse de leurs politiques en appliquant ces outils pour l'évaluation et l'analyse des systèmes énergétiques. A ce titre, la possibilité d'un travail collaboratif apparaît d'autant plus pertinente de nos jours qu'à sa création si on considère les interactions de plus en plus complexes entre les sphères économiques, énergétiques et environnementales, le contexte climatique et celui des ressources, le développement de nouvelles filières<sup>14</sup>. Depuis près de quarante ans donc, l'ETSAP est devenu une communauté de modélisation bottom-up reconnue, évoluant parmi les modèles comme MESSAGE (Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental impacts) de l'IASA (International Institute for Applied Systems Analysis) ou ENPEP (Energy and Power Evaluation Program) de l'AIEA (Agence Internationale d'Energie Atomique) pour les pays en développement particulièrement par exemple.

Le CMA dispose des modèles TIMES-France et TIMES-Réunion, développés en interne, d'un modèle pan-européen (PET : Pan European TIMES Model) développé en collaboration par la communauté ETSAP au gré de projets européens (et notamment des projets NEEDS : Integrated Project on New Energy Externalities – Developments for Sustainability et RES 2020 : Renewable Energy Sources – “Monitoring and Evaluation of the RES directives implementation in EU27 and policy recommendations for 2020), et de deux versions du modèle mondial TIAM (TIMES Integrated Assessment Model), à savoir la version officielle de l'ETSAP – ETSAP-TIAM – et la version développée par le CMA, TIAM-FR, dérivée de ETSAP-TIAM et dont j'ai la responsabilité depuis 2009.

Le modèle TIAM a en tout premier lieu été développé en 1999 par l'équipe du GERAD (Groupe d'Etudes et de Recherche en Analyse des Décisions) à Montréal (Richard Loulou, Maryse Labriet et Amit Kanudia) et fut fourni à l'ETSAP en 2004 en échange du co-financement<sup>15</sup> de ses améliorations et de la participation de l'EMF (Energy Modeling Forum). Les principaux contributeurs de l'ETSAP furent alors KU Leuven (Katholieke Universiteit Leuven, en la personne de Denise van Regemorter), IER (Institute for Energy Economics and the Rational Use of Energy) de l'Université de Stuttgart

---

<sup>14</sup> International Energy Agency, Implementing Agreement for a Program of Energy Technology Systems Analysis (ETSAP IA), Strategic Plan (2015-2020), April 2015.

<sup>15</sup> Le financement en question est de 300 000 euros sur 6 ans et le coût estimé du modèle détenu par l'ETSAP à l'issue de ce partenariat est d'environ 2 millions d'euros.

(Uwe Remme et Markus Blesl) et VTT (Technical Research Centre) en Finlande (Antti Lethila, avec un apport principalement sur le code GAMS (General Algebraic Modeling System), le module climatique et le programme stochastique). S'appuyant sur des expériences de modélisation précédentes, le modèle s'est vu modifié avec un focus sur les technologies, les échanges d'énergie, les problèmes environnementaux. Un premier lien fut également établi avec un modèle macroéconomique (GEM-E3) afin de déterminer les demandes d'usages finaux du modèle et l'horizon temporel fut rallongé à très long terme, soit 2100. Mis à disposition des membres de l'ETSAP qui le souhaitaient, le modèle mondial n'a dès lors cessé de connaître des développements. Il existe depuis différentes versions dérivées de ETSAP-TIAM propres à chaque équipe de modélisateurs : principalement TIAM-UCL pour l'University College London en Angleterre, TIAM-ECN pour le Energy Research Centre of the Netherlands, TIAM-IER pour l'Université de Stuttgart, VTT-TIAM pour le Technical Research Centre of Finland, et TIAM-FR pour le CMA.

S'agissant des outils de modélisation prospective, ma recherche s'articule principalement autour de ces deux modèles mondiaux de la famille TIMES, TIAM-FR et ETSAP-TIAM. S'agissant du second, ETSAP-TIAM<sub>2014</sub> est la dernière version en cours de développement dans le cadre d'un consortium composé de laboratoires de recherche européens membres de l'ETSAP, consortium au sein duquel je représente le CMA depuis 2011. Les actualisations et améliorations apportées à ETSAP-TIAM participent également au développement de TIAM-FR dans la mesure où elles peuvent ensuite y être intégrées si cela est souhaité. Plus généralement, le développement du modèle intervient pour ma part à différents niveaux :

- Le recalibrage et l'actualisation des données qui sont le cœur du modèle ;
- Le développement des filières technologiques ;
- La représentation régionale ;
- L'approche combinée Bottom-up/Top down.

Avant de présenter divers approfondissements réalisés sur le modèle TIAM-FR, la section suivante vise à apporter un éclairage sur le paradigme de modélisation auquel ce dernier se réfère. Les caractéristiques générales du modèle seront également précisées.

## **A. Le modèle TIAM – TIMES Integrated Assessment Model**

TIMES est un générateur de modèles technico-économiques d'équilibre partiel représentant le système énergétique de zones géographiques et périodes temporelles déterminées (par le modélisateur). Tous les modèles TIMES mettent ainsi en œuvre une structure mathématique identique, comme par exemple TIAM, un modèle intégré de la famille TIMES représentant le système énergétique mondial. Les modèles TIMES varient donc les uns des autres au regard des données d'entrée – qualitatives et quantitatives – qui les constituent et qui concernent les vecteurs énergétiques, les technologies représentées, les émissions de GES dont il faut tenir compte, le périmètre géographique, l'horizon temporel et les valeurs des paramètres technologiques et économiques spécifiques à chaque technologie, région, période. La dynamique des systèmes énergétiques diffère donc suivant que ces derniers sont locaux, nationaux ou multirégionaux, suivant la base technologique sur laquelle ils reposent et suivant l'approche sectorielle considérée (transport, électricité, chauffage urbain, etc.).

Toutes ces informations définissent ensemble une base de données qui est structurée suivant le concept de Système Energétique de Référence (RES pour Reference Energy System) représentant ainsi de manière très détaillée les flux d'énergie au niveau technologique. Le RES est donc constitué des technologies, des commodités et des flux de commodités, incluant tous les paramètres les caractérisant. Les technologies représentent les dispositifs physiques transformant des commodités en d'autres commodités. Ils peuvent être des sources primaires de commodités (technologies d'extraction ou procédé d'importation par exemple) ou des activités de transformation (centrales électriques, raffineries, dispositifs pour les utilisations finales comme les voitures et les chauffages, etc.). Les commodités représentent les vecteurs énergétiques, les services énergétiques, les matériaux, et les émissions de GES. Une commodité est généralement produite par des technologies et/ou consommée par d'autres. Quant aux flux de commodités, ils constituent les liens entre les technologies et les commodités. Un flux de commodité est de la même nature que la commodité mais ce flux est attaché à une technologie spécifique et représente un input ou un output de celle-ci. Par exemple, le fuel est une commodité, alors que le fuel pour les chaudières résidentielles au mazout est un flux de commodité. Ainsi, pour construire et développer un modèle TIMES, le modélisateur doit fournir la structure technologique de l'ensemble de la chaîne énergétique (de l'extraction d'énergie primaire à la transformation en usages finaux) de la région qu'il souhaite étudier. La description complète de chaque commodité et technologie avec leurs liens associés doit être renseignée ainsi que la définition de toutes les contraintes que l'on veut modéliser : les contraintes d'approvisionnements, les contraintes techniques (les caractéristiques de chaque technologie), les contraintes non techniques (spécifications environnementales, décisions politiques, etc.) et les contraintes de demandes (scénarios de demandes exogènes). Le RES fournit ainsi une représentation de la chaîne énergétique allant de l'extraction d'énergie primaire à la transformation en usages énergétiques finaux et aux secteurs utilisant cette énergie finale.

TIMES optimise sur l'horizon temporel défini le coût actualisé du système énergétique sous contrainte de satisfaction de la demande. Plus précisément, écrit en langage GAMS, il répond à un problème de programmation linéaire de minimisation sous contraintes du coût total actualisé du système énergétique, tel que présenté dans l'équation ci-dessous :

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sum_i c_i X_i \\ & \text{sc } \sum_i a_{ij} X_i \geq b_j \text{ et } X_i \geq 0 \end{aligned}$$

Où,  $c_i$  représentent les coefficients de la fonction objectif ;  $a_{ij}$  et  $b_j$ , représentent les paramètres connus des contraintes et  $X_i$ , les variables de décision. Ces variables de décision sont les investissements en nouvelles capacités (GW), la capacité totale installée (GW) et le niveau de fonctionnement ou d'activité (PJ), ceci pour chaque technologie, les quantités de vecteur énergétique extraites, importées ou exportées (PJ) ou encore les niveaux d'émissions des GES représentés dans le modèle (kt). Il calcule ainsi la valeur actuelle nette du coût total annuel du système. Ce coût total annuel est actualisé par rapport à l'année de référence du modèle et inclut les coûts d'investissements, les coûts fixes et variables d'opération et de maintenance, les coûts associés aux ressources externes comme les coûts d'extraction, d'importation, d'exportation, les éventuelles taxes et subventions, etc. Ces coûts actualisés sont ainsi agrégés en un coût total correspondant à la fonction objectif à minimiser en

satisfaisant un certain nombre de contraintes techniques et/ou environnementales, en plus de la contrainte de satisfaction de toutes les demandes. Ces contraintes techniques correspondent notamment au respect des paramètres renseignés pour chaque technologie comme les limites de fonctionnement suivant le facteur de disponibilité, les limites de capacité, la durée de vie et l'année de disponibilité, etc. Quant aux contraintes environnementales, elles concernent par exemple des limitations d'émissions de GES. Ainsi, la fonction objectif se présente de la forme suivante :

$$NPV = \sum_{r=1}^R \sum_{y \in \text{years}} (1 + d_{r,y})^{\text{ref}y - y} * \text{ANNCost}(r,y)$$

Où NPV est la valeur actuelle nette du coût total ; ANNCost (r,y) est le coût total annuel dans la région r et à l'année y ;  $d_{r,y}$  est le taux d'actualisation ; refy est l'année de référence pour l'actualisation ; years est l'ensemble des années et R l'ensemble des régions. En satisfaisant les demandes de services énergétiques implémentées au coût global minimum, des décisions sont ainsi prises concernant les investissements, la fourniture d'énergies primaire et finale, les échanges d'énergies (etc.) sur toute la période définie et chaque région du modèle. Plus précisément, TIMES produit deux types de résultats lors du calcul d'optimisation du modèle. Premièrement, la solution primale du programme linéaire fournit, pour chaque période de temps et région :

- Les investissements technologiques ;
- Les niveaux d'exploitation/fonctionnement des technologies ;
- Les flux de commodités input/output de chaque technologie ;
- Les imports/exports de chaque commodité échangeable ;
- Les niveaux d'extraction de chaque ressource primaire ;
- Les émissions par technologie, par secteur et totales.

De plus, le programme fournit une deuxième solution, appelé solution duale, qui fournit la « valeur fictive » (shadow price) de chaque commodité présente dans le RES (combustibles, matériaux, services énergétiques, émissions). Ainsi, est disponible l'information sur les coûts marginaux des mesures environnementales comme les cibles de réduction de GES.

L'intérêt de ce type de modèle est l'opportunité qu'ils offrent d'explorer les futurs énergétiques possibles sur le long terme en se fondant sur des scénarios, autrement dit des hypothèses cohérentes sur les trajectoires des déterminants du système.

S'agissant plus précisément du modèle mondial TIAM, il s'agit d'un modèle multirégional représentant le monde suivant une division en 15 régions qui sont : Afrique (AFR), Australie/Nouvelle-Zélande (AUS), Canada (CAN), Chine (incluant Hong Kong, excluant Taïwan ; CHI), Amérique Centrale et du Sud (CSA), Europe de l'Est (EEU), l'ancienne Union Soviétique (incluant les pays Baltes ; FSU), Inde (IND), Japon (JPN), Moyen Orient (incluant la Turquie ; MEA), Mexique (MEX), les autres pays en développement d'Asie (incluant Taïwan et les îles Pacifiques ; ODA), Corée du Sud (SKO), Etats Unis d'Amérique (USA) et Europe de l'Ouest (EU-15, Islande, Malte, Norvège et Suisse incluses ; WEU). Ces différentes régions du monde sont liées entre elles en matière d'échanges d'énergies et de droits d'émission entre régions si cela est souhaité par le modélisateur. Cet aspect des échanges est matérialisé par un commerce bilatéral où les choix des énergies et des régions prenant part aux échanges sont définis par l'utilisateur. L'horizon temporel

s'étend de 2005 à 2100 et les périodes au sein de cet horizon sont déterminées par l'utilisateur. Il peut être divisé en termes d'années mais également en subdivisions dans l'année. Ces subdivisions (saisons, jour/nuit) permettent de prendre en compte certaines caractéristiques variables durant l'année (la consommation électrique, la demande de chauffage, la production solaire ou hydraulique, etc.).

Il s'agit donc également d'un modèle technico-économique qui représente le système énergétique mondial via des milliers de technologies réparties dans plusieurs secteurs (agriculture, industrie, résidentiel, tertiaire, transport). Le schéma suivant présente une vue synthétique du système énergétique de référence de TIAM.

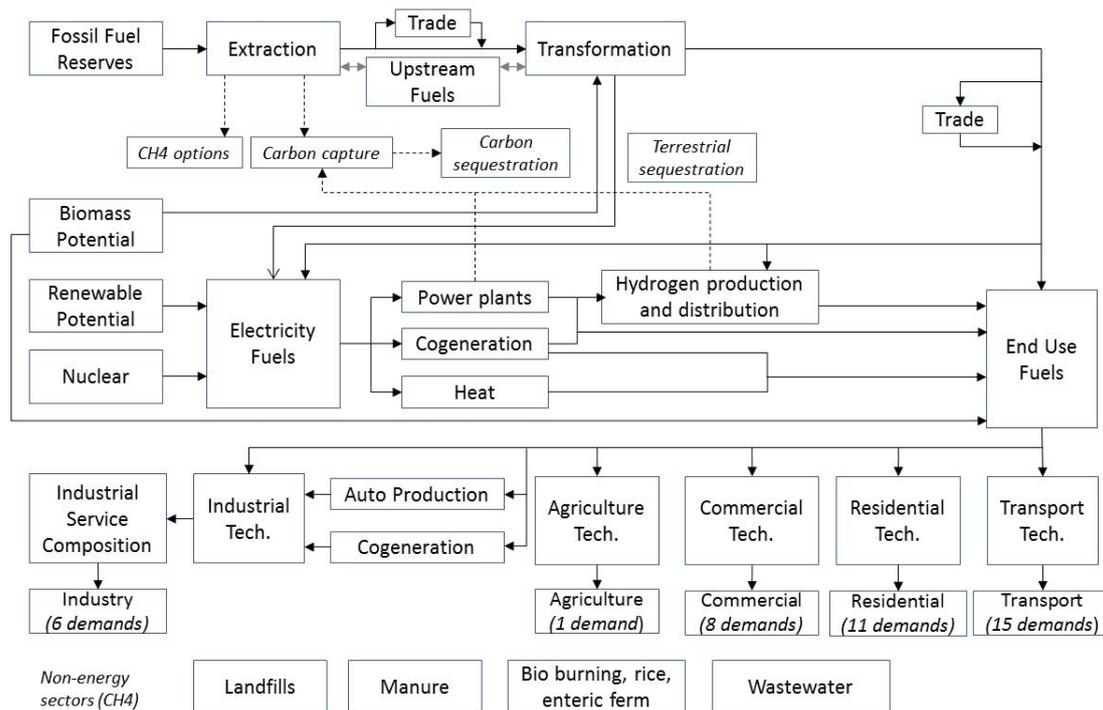


Figure 4: Représentation synthétique du système énergétique de référence de TIAM

Ainsi, de l'extraction d'énergie primaire à la transformation en usages finaux, toute la chaîne énergétique est représentée, avec pour objectif de satisfaire des demandes de services énergétiques à moindre coût, sous contraintes technologiques et/ou environnementales posées par l'utilisateur (Figure 5). L'un des intérêts de ce modèle est son horizon temporel, qui est de très long terme, jusqu'en 2100, permettant de considérer les problèmes environnementaux globaux comme le réchauffement climatique, qui est au cœur du débat sur la scène internationale depuis quelques années. TIAM prend en compte différents gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), le méthane ( $\text{CH}_4$ ) et le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) que le module climatique intégré au modèle permet de considérer suivant leur potentiel de réchauffement climatique, l'augmentation de la température globale, la concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$  et le forçage radiatif.

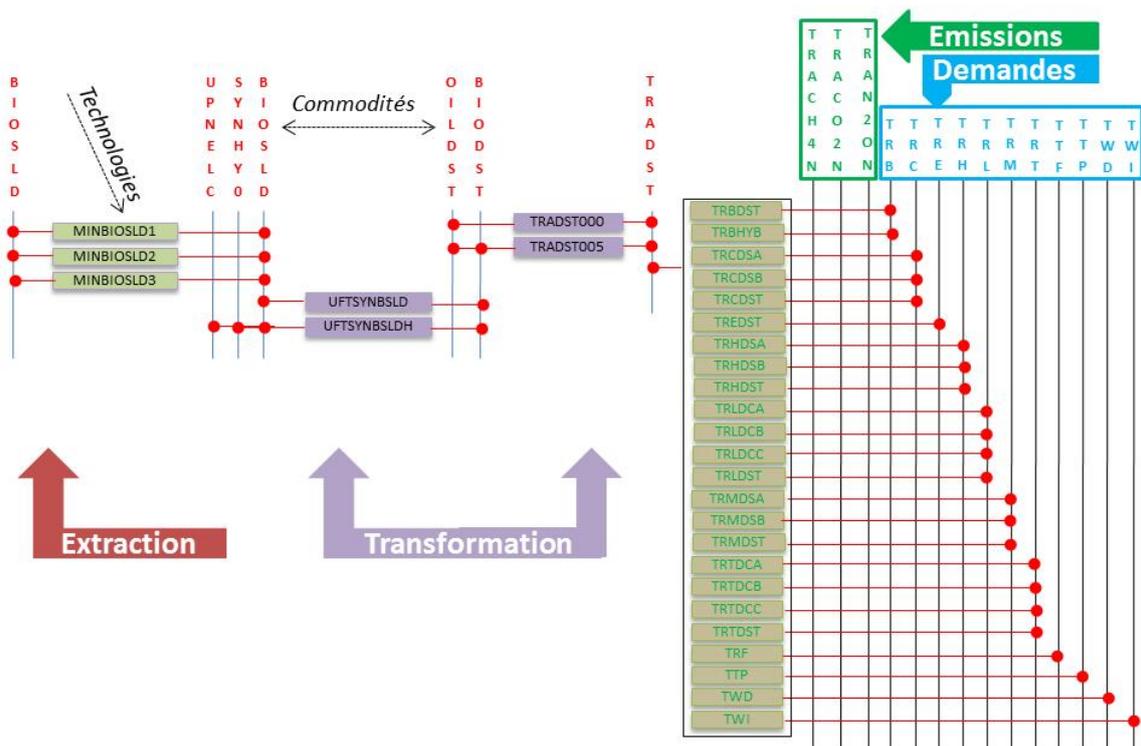


Figure 5 : Extrait du Système Energétique de Référence concernant la filière biodiesel dans TIAM-FR

S'agissant plus précisément des principales spécifications du RES de TIAM, on notera qu'en matière de fourniture d'énergie, chaque énergie primaire est extraite de différentes réserves (fossile, biomasse...) ou de potentiels de ressources (énergies non fossiles de type éolien, solaire, hydroélectricité, géothermie, etc.) suivant un potentiel et un coût spécifique. Cela constitue une courbe de fourniture pour chaque forme d'énergie. Les ressources et formes d'énergie primaires modélisées dans TIAM sont : charbon (4 ressources, 2 formes), pétrole brut (21 ressources, 4 formes), gaz naturel (11 ressources, 1 forme) et biomasse solide (8 ressources, 6 formes). Les types d'énergie échangée de façon endogène entre les 15 régions du modèle sont les suivants : charbon (lignite et houille), pétrole brut, produits pétroliers raffinés (essence, diesel, fioul lourd, naphta), gaz naturel, gaz naturel liquéfié, et les émissions atmosphériques. En outre, en ce qui concerne la transformation des énergies, le pétrole brut est transformé en 15 produits pétroliers raffinés via des technologies de raffinage ; la biomasse solide en alcool ; le charbon et le gaz naturel en hydrogène via des procédés de gazéification ou de reformage (l'hydrogène peut aussi être produit par électrolyse) ; le gaz naturel peut être liquéfié, et le GNL gazéifié. L'électricité est produite à partir d'un grand nombre de technologies, chacune via une ou plusieurs ressources primaires comme le charbon, gaz, fioul lourd, vent, hydraulique, biomasse, etc. Ensuite, les secteurs d'utilisation finale de l'énergie incluent l'agriculture, le résidentiel, le tertiaire, l'industrie et le transport. Il existe plusieurs demandes de services énergétiques indépendantes par secteur, et pour chacun de ces services, une série de technologies en concurrence.

Enfin, TIAM-FR est piloté par 42 demandes d'utilisation finale regroupées entre 6 secteurs : le transport, le résidentiel, le commercial, l'agriculture, l'industriel, et autres (Figure 6). Chaque demande énergétique est, soit prédéterminée de façon exogène, auquel cas l'évolution de la demande est fonction de paramètres exogènes spécifiés par l'utilisateur, soit calculée de manière endogène, via

une fonction de demande élastique, basée sur une série d'hypothèses exogènes sur l'évolution des tendances des drivers de la demande. Dans le deuxième cas, les tendances de la demande sont spécifiées par plusieurs drivers, comme l'évolution du PIB, la population, et les productions sectorielles. Ces drivers sont déterminés par les utilisateurs et obtenus via d'autres modèles (comme GEMINI-E3 par exemple) ou sources externes reconnus. Une fois que les drivers sont déterminés et quantifiés, la construction du scénario de demande de référence requiert le calcul de l'ensemble des demandes en services énergétiques sur la période. Pour cela, l'utilisateur doit fournir, pour chaque demande : la demande de l'année de référence, issue d'une ou plusieurs bases de données statistiques (IEA energy statistics dans notre cas), un ou plusieurs déterminants ou drivers macroéconomiques pour la demande, qui peut être le PIB, la population, PIB par habitant (etc.) et l'élasticité de la demande. Ainsi, la projection de la demande est obtenue avec la formule suivante :

$$\text{Demand}_t = \text{Demand}_{2010} * k * \left(\frac{\text{Driver}(t)}{\text{Driver}(2010)}\right)^{\text{Elasticity}}$$

Avec k étant la plupart du temps, soit la population (ou nombre de foyers) quand le driver principal est une valeur par habitant, soit la projection de demande exogène lorsqu'elle est disponible. On notera que TIMES/TIAM a aussi la possibilité de déterminer les demandes endogènes via les élasticités des prix à la demande, en s'ajustant aux changements des conditions du modèle.

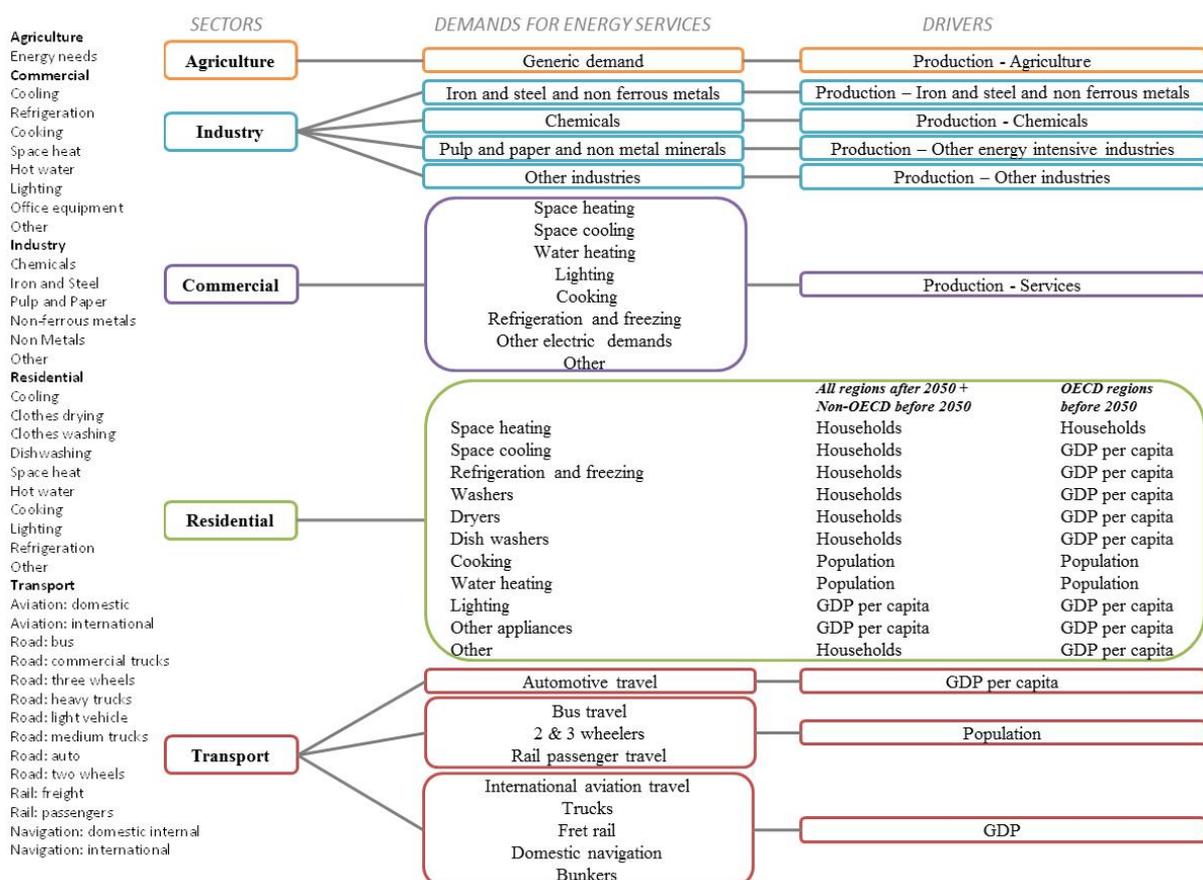


Figure 6: Les demandes de services énergétiques de TIAM et leurs déterminants

## **B. Recalibrage, mise à jour des données et développement du modèle TIAM-FR**

Parmi les développements apportés au modèle, les mises à jour des données qui le constituent représentent une des conditions nécessaires à sa pertinence. Par exemple, les trajectoires à long terme des demandes en services énergétiques étant déterminées par le modélisateur via des déterminants de croissance, il convient d'en renseigner l'évolution sur la période considérée par le modèle. Ces informations proviennent de différentes sources comme les bases de données des Nations-Unies (population), de la FAO (production agricole), de l'AIE notamment via son Energy Technology Perspectives (productions sectorielles). Le modèle doit ainsi être mis à jour au gré des modifications apportées aux différentes bases de données ou à l'apport d'autres sources. De la même manière, les paramètres caractérisant les milliers de technologies au cœur du modèle peuvent varier au fur et à mesure du développement des technologies (coûts, rendements, nouvelles ressources, etc.). Par ailleurs, dans le cadre du consortium ETSAP-TIAM dont je fais partie (et qui est expliqué plus en détail dans la seconde partie), je contribue au maintien et développement de la version officielle TIAM de l'ETSAP (ETSAP-TIAM). Ainsi, chaque laboratoire partenaire apporte des perfectionnements au modèle qui peuvent ensuite être implémentés dans nos versions nationales respectives si cela est souhaité. Je « nourris » ainsi TIAM-FR de diverses implémentations ou mises à jour de données issues des travaux réalisés au sein du consortium. Il peut s'agir de données technico-économiques des technologies, voire de l'implémentation de nouvelles technologies, des données socio-économiques orientant les trajectoires des demandes d'usages finaux sur l'horizon temporel du modèle, des mises à jour de potentiels des ressources, etc.

Outre cette nécessaire mise à jour, un grand chantier a été entrepris et réside dans le changement de l'année de référence du modèle qui est 2005. Mon projet à ce niveau a consisté à modifier le modèle pour faire passer cette année de référence à 2010. Afin de m'aider dans cette gageure, j'ai pu au début de ce développement travailler en collaboration avec un élève du Mastère Spécialisé Optimisation des Systèmes Énergétiques (OSE) que j'ai ainsi encadré durant un stage de six mois réalisé au CMA (Nicolas Garcia, 2014). Ce travail a été réalisé en concertation avec la recherche menée par Sébastien Postic dans le cadre de sa thèse, thèse que j'ai également co-encadrée. Sébastien a, plus précisément, développé un modèle TIMES dédié à l'Amérique Latine (TIMES-ALyC), une des régions représentées dans TIAM-FR (CSA, Central and South America). L'ambition étant à terme de coupler ces deux modèles, il était important de procéder à des ajustements cohérents et de s'assurer de la compatibilité des deux systèmes énergétiques. Il s'agissait à ce stade de travailler sur les bilans énergétiques de chacune des régions du modèle. Nous avons plus précisément extrait nos données de la base IEA World Energy Statistics and Balances 2013. Cette base de données comprend toutes les données sur la fourniture et la consommation de charbon, de pétrole, de gaz, d'électricité, de chaleur, d'énergies renouvelables, de déchets en prenant en compte la production, les échanges et la consommation finale avec des indicateurs énergétiques et économiques pour plus de 150 pays et régions du monde. Toutes les demandes de services énergétiques de cette année de référence ont ainsi été recalibrées, ainsi que les niveaux de production d'énergie pour chacun des secteurs du modèle, pour chaque ressource primaire et chaque région (voire sous-régions). Cela concerne plus précisément le secteur électrique qui décrit toute la production d'électricité et/ou de chaleur, le secteur « upstream » qui décrit l'extraction des ressources fossiles, les potentiels renouvelables, les processus de transformation des combustibles, les raffineries de pétrole, etc. ; les secteurs d'usages finaux que sont l'agriculture, le transport, le résidentiel, le tertiaire et l'industrie qui correspond aux usages industriels

et aussi à l'électricité industrielle. Ces données renseignent sur la structure de base du modèle, la consommation de carburant par utilisation finale de l'année de base, la production d'énergie par combustible de l'année de base, les demandes des services énergétiques de base, les technologies existantes déjà installées, les contraintes d'utilisation, les coefficients d'émission par combustible, divers autres paramètres comme le taux d'actualisation ou la participation à la pointe électrique (la consommation d'électricité la plus élevée pendant une période déterminée).

Ainsi, à l'année de référence ou année de base, c'est une image du système énergétique existant qui est reproduite, une image au temps  $t$  du système tenant compte de tous les développements passés qui ont été mis en œuvre et donc de toutes les capacités installées résiduelles et leur projection de fin de vie avant d'être remplacées par de nouvelles technologies qui sont implémentées dans le modèle. Ensuite, un travail sur les scénarios d'évolution des énergies et sur les contraintes de déploiement des technologies au cours de tout l'horizon temporel fut bien sûr également nécessaire. Même si le cœur du travail concerne la période initiale du modèle, des ajustements sur toute la période doivent être pensés et opérés, notamment s'agissant des futurs envisageables des différentes technologies et ressources. Ce travail a ainsi été l'occasion de faire évoluer les contraintes de calibrage du scénario référence, le Business as Usual (BAU) qui sert de base de comparaison entre le système énergétique sans politique ou inflexion aucune et les scénarios de contraintes technologiques, de ressources ou environnementales que l'on cherche à analyser et discuter. Il est à noter qu'un gros travail de lisibilité, d'explicitation des données et des contraintes a été réalisé en parallèle de ce recalibrage, tout comme des simplifications et le nettoyage des vestiges des précédentes modifications et des mises à jour des versions de TIAM. A ce jour, le modèle tourne mais les vérifications concernant la pertinence des résultats se poursuivent, notamment au gré des études menées.

J'ai également travaillé à d'autres développements touchant notamment à des filières technologiques spécifiques. En effet, un autre niveau de perfectionnement réside dans l'intégration de nouvelles technologies puisque ce modèle d'optimisation repose sur une importante base de technologies, existantes et futures, et permet notamment de fournir des recommandations sur les portfolios de technologies qui seraient les plus à même de répondre à une problématique climatique et d'approvisionnement énergétique. Aussi, pour se faire, il est crucial de pouvoir mettre en compétition toutes les technologies futures et d'assurer une veille technologique des éventuels nouveaux procédés et nouvelles énergies, en gardant la mesure de l'incertitude entourant ces nouvelles entrées. Les choix technologiques et de production d'énergie doivent également être au plus près des options à discuter dans l'avenir de la fourniture énergétique. Dans le contexte de lutte contre le changement climatique et de déploiement d'options de décarbonisation des systèmes énergétiques, je me suis particulièrement intéressée aux technologies de capture et séquestration du carbone (CSC). En outre, j'ai intégré des centrales électriques de co-combustion charbon/biomasse avec ou sans capture du carbone. Une partie de ma recherche a porté sur l'analyse des engagements climatiques et le rôle joué d'une part, par la capture et la séquestration du carbone et d'autre part, par le développement de la filière biomasse dans la transition vers un système électrique décarboné.

## **C. Développement des filières technologiques : la place du charbon et de la biomasse dans la transition vers un système décarboné et le développement des technologies de capture et séquestration du carbone**

Les défis du changement climatique impliquent de totalement repenser le système énergétique mondial et tendent à prôner la fin des énergies fossiles. En particulier l'Accord de Paris signé à l'issue de la COP 21 en décembre 2015 et entré en vigueur en novembre 2016 constitue le signal fort d'une transition amorcée vers des systèmes décarbonés en soustrayant nos sociétés de leur dépendance aux énergies fossiles. Parmi les principales cibles, le charbon était responsable en 2014 de près de 46 % des émissions de CO<sub>2</sub> de la planète et assurait près de 41 % de la production mondiale d'électricité, contribution atteignant 75 % en Chine qui représente elle-même 42 % de la production mondiale d'électricité par le charbon (IEA, 2016). Encore présentes en quantité abondante, les réserves de charbon pouvant assurer une centaine d'année de consommation<sup>16</sup>, cette ressource permet de répondre aux besoins énergétiques toujours croissants de nombreux pays, en particulier ceux pour qui les énergies renouvelables demeurent encore trop souvent hors de portée. Le succès d'une transition énergétique à grande échelle pourrait alors passer par une exploitation plus responsable de ces ressources fossiles. En particulier, les technologies de capture et séquestration du carbone sont très largement présentées dans les résultats des modèles prospectifs mondiaux comme une solution permettant d'atteindre des objectifs climatiques ambitieux, en permettant de disposer d'un charbon propre. Confortant cette orientation, on pourrait citer par exemple la proposition de directive du Parlement européen et du Conseil 2008/0015 (CDO) relative au stockage géologique du dioxyde de carbone qui a été présentée par la Commission en 2008 et qui résume bien la situation : « L'efficacité énergétique et les énergies renouvelables représentent les solutions les plus durables à long terme, tant pour la sécurité d'approvisionnement que pour la préservation du climat. Cependant, nous ne pourrions diviser par deux les émissions de CO<sub>2</sub> de l'Union européenne ou du monde d'ici à 2050 sans recourir aux possibilités de captage du CO<sub>2</sub> émis par les installations industrielles et de stockage de ce dernier dans des formations géologiques (captage et stockage du dioxyde de carbone ou CSC). Environ un tiers des centrales électriques au charbon d'Europe seront remplacées au cours des 10 prochaines années. Sur le plan international, la consommation d'énergie de la Chine, de l'Inde, du Brésil, de l'Afrique du Sud et du Mexique va faire considérablement augmenter la demande mondiale qui devra probablement être satisfaite en grande partie grâce aux combustibles fossiles. Le présent cadre législatif vise à faire en sorte que les techniques de captage et stockage du CO<sub>2</sub> représentent une option valable pour réduire les émissions et que ces techniques soient mises en œuvre de façon sûre et responsable. ». Ainsi, à la fois perçu comme un des plus prometteurs moyens de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et comme une source de faux espoirs devant la lenteur d'évolution de la filière, la CSC peut être considérée comme une solution complémentaire et de transition ; le challenge restant de diminuer les coûts et de régler la question des risques à temps...

Dans tous les cas, éviter les gigatonnes attendues d'émissions de CO<sub>2</sub> en investissant dans des technologies de CSC suppose le développement d'importantes capacités de stockage de carbone. En outre, les technologies CSC génèrent des controverses persistantes et suscitent de nombreuses

---

<sup>16</sup> Les réserves prouvées de charbon à fin 2008 sont estimées par le World Energy Council (WEC) à près de 826 Gt, représentant environ 120 années de production au rythme actuel d'extraction, soit beaucoup plus que le pétrole (40 ans) ou le gaz naturel (65 ans).

interrogations chez les experts. Elles concernent non seulement les coûts importants et incertains que cette technologie requiert ou encore le trop faible niveau d'investissements actuels dans des projets de développement à grande échelle incluant les infrastructures (transport, plateformes mutualisées) mais aussi les incitations réduites si on compare aux autres options comme les renouvelables. Sans oublier que les risques du stockage pour l'environnement et la santé humaine remettent en question l'acceptabilité sociale et la place appropriée des technologies de CSC au sein du portefeuille de stratégies de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

## 1. Capture et séquestration du carbone : l'importance des potentiels de stockage du carbone et des coûts de transport

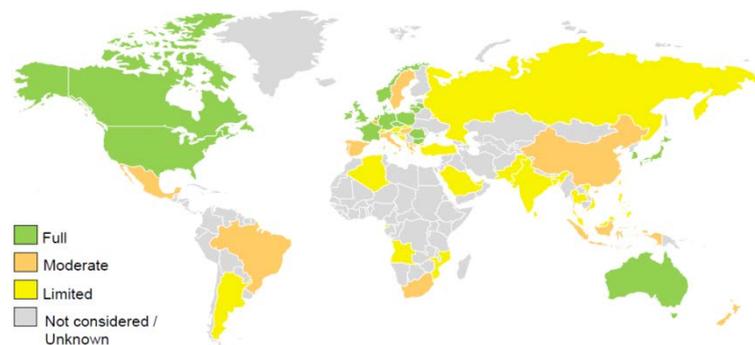
Le potentiel de déploiement de la CSC est indubitablement lié au potentiel de stockage du carbone, or le haut niveau supposé de ce potentiel dans le modèle TIAM n'apparaissant pas comme une contrainte pour le développement de cette solution de décarbonisation, j'ai cherché à vérifier la pertinence de ces données. Ces dernières n'étant pas toujours en accord avec la littérature (Hendricks, 2004; Dooley et al., 2005a,b; DOE & NETL; Ecofys, NACSA, etc.), dans ce contexte, j'ai cherché à réaliser un état de l'art des potentiels régionaux de stockage de carbone afin de proposer de nouvelles séries de données dans le modèle et d'analyser la sensibilité des investissements en CSC face à différents niveaux de potentiels. Ainsi, avec l'aide de Govind Malhotra, dont j'ai encadré le stage (cf p.) et qui a réalisé une large revue de littérature et état de l'art des bases de données disponibles sur les potentiels de stockage géologique, j'ai mené une analyse avec TIAM-FR visant à discuter de l'impact de ce potentiel sur le développement de l'option CSC. Une autre partie de ce travail a consisté à distinguer les potentiels onshore et offshore des sites dont la distinction n'était pas présente dans le modèle et en particulier en ce qui concerne les aquifères salins profonds représentant les plus importants potentiels de stockage. Une analyse a été par ailleurs menée dans le cas d'une interdiction de stockage onshore, exprimant une hypothétique politique considérant la résistance publique envers un stockage onshore et suivant le principe du NIMBY, autrement dit « not in my backyard ». Enfin, même si la capture représente la plus importante partie du coût de la CSC, contribuant à hauteur de 80% voire plus, nous avons travaillé sur les coûts de stockage du carbone et du transport. Et en raison de la nouvelle classification concernant la localisation des aquifères salins profonds, onshore et offshore, des coûts différents ont été implémentés dans le modèle suivant l'emplacement du site.

Table 2: Potentiel de stockage initial supposé dans TIAM-FR

Gt CO <sub>2</sub>	AFR	AUS	CAN	CHI	CSA	EEU	FSU	IND	JPN	MEA	MEX	ODA	SKO	USA	WEU	WORLD
Enhanced Oil Recovery	3	0	3	1	8	2	15	0	0	38	0	1	0	8	0	77
Depleted oil fields (onshore)	3	0	3	1	8	2	23	0	0	56	4	8	0	8	0	113
Depleted gas fields (onshore)	11	1	10	0	23	0	168	0	0	150	8	23	0	8	11	411
Depleted oil fields (offshore)	2	1	1	0	2	0	0	0	0	8	2	1	0	8	3	26
Depleted gas fields (offshore)	4	6	5	0	0	0	0	0	0	38	8	15	0	8	23	105
Enhanced Coalbed Methane recovery <1000 m	4	15	8	8	0	1	13	4	0	0	0	12	0	45	6	115
Enhanced Coalbed Methane recovery >1000 m	4	15	8	8	0	1	13	4	0	0	0	12	0	45	6	115
Deep saline aquifers (onshore)	1000	500	667	500	1000	250	1000	500	5	500	250	1000	10	1000	250	8432
<b>TOTAL</b>	<b>1029</b>	<b>538</b>	<b>702</b>	<b>518</b>	<b>1039</b>	<b>256</b>	<b>1231</b>	<b>508</b>	<b>5</b>	<b>789</b>	<b>271</b>	<b>1071</b>	<b>10</b>	<b>1128</b>	<b>300</b>	<b>9392</b>

Plus précisément, le potentiel global initialement implémenté dans le modèle est d'environ 10 000 Gt (Table 2). A titre de comparaison, ce niveau est plus optimiste que MERGE (1 466 Gt) et TIMER (5 500 Gt) mais est plus restrictif que dans REMIND, POLES et E3MG, qui posent l'hypothèse d'un potentiel illimité. Tokimatsu et al. (2016) quant à eux, dans leur analyse de trois scénarios à zéro-émission visant à atteindre l'objectif de 2°C voire moins, sur la période 2010-2150, estiment un stockage géologique du CO<sub>2</sub> cumulé compris entre environ 2 000 et 6 000 Gt. Le potentiel de stockage est réparti entre les différentes régions du modèle et les différents types de sites de stockage.

Après une importante revue de littérature et de bases de données, de nouveaux potentiels de stockage par région et par site ont été implémentés dans le modèle. En particulier, une nouvelle distribution entre la localisation onshore et offshore des sites de stockage a été intégrée. Cela concerne plus précisément les aquifères salins profonds et la récupération assistée du pétrole (RAP ou plus couramment EOR en anglais) dont cette distinction n'avait pas été opérée initialement, contrairement aux autres types de sites de stockage comme les gisements épuisés de gaz ou de pétrole. À l'heure actuelle, très peu de pays ont conduit une réelle évaluation de leur capacité de stockage. La carte suivante (Figure 7) présente les initiatives régionales en la matière et indique, en vert, les régions ayant réalisé une évaluation complète, en orange celles ayant conduit une évaluation modérée, en jaune une évaluation limitée, et en gris, celles n'ayant entrepris aucune évaluation.



Source: Consoli and Causebrook, 2016

Fig. 7: Maturité de l'évaluation régionale du potentiel de stockage du carbone

De nombreuses sources ont ainsi été utilisées, comme – non exhaustivement – the North American Carbon Storage Atlas (NACSA 2012; Wright et al. 2013), the United States Carbon Utilization and Storage Atlas – DOE & NETL (2012, 4<sup>th</sup> edition), Wuppertal Institute reports (2012a,b,c), IEA (2008), IEA GHG (2005, 2008a,b, 2009a,b, 2010), Bachu (2003), Bachu et al. (2007), Bradshaw et al. (2007), (Dooley (2006), Dahowski et al. (2011), Dooley et al. (2005), Dooley and Friedman (2004, 2005), Hendricks and Ecofys (Hendricks et al. 2004), ZEP (2011), Michael et al. (2009a,b), McKinsey & Company (2008), Kolenkovi et al. (2013), USGS World Petroleum Assessment (2000), van den Broek et al. (2010), et de nombreuses sources nationales spécifiques. Les évaluations qui ont été réalisées ne couvrent pas forcément tous les types de stockage. En outre différentes méthodes d'évaluation de la capacité de stockage et hypothèses existent et sont utilisées suivant les pays ou les organismes. Les anciens gisements de pétrole et de gaz sont dans l'ensemble bien évalués car les données sont relativement disponibles. Les données de localisation de l'United States Geological Survey (USGS) et du Total Petroleum Systems (TPS) ont été considérées pour déterminer la classification

onshore/offshore de ces gisements. En ce qui concerne les aquifères salins et la récupération assistée du méthane de gisements de houille (ECBM), les données ont dû être extrapolées pour l'ensemble du pays sur la base de quelques gisements étudiés. Il est également plus difficile de trouver une classification onshore/offshore pour ces gisements. Ainsi, après étude des références et estimations existantes, nous avons dû faire différents choix correspondant aux méthodologies rendant les hypothèses les plus pertinentes et plausibles. En ce qui concerne l'estimation de l'EOR et les gisements pétrolifères épuisés, 96% des réserves pétrolières mondiales connues ont été étudiées ; 60% s'agissant des gisements de gaz. En ce qui concerne le stockage dans les gisements gaziers épuisés, pour des raisons financières et économiques, nous avons décidé d'exclure ceux qui présentaient une capacité inférieure à 50 Mt de carbone en onshore et 100 Mt de carbone en offshore.

Examiner les capacités de stockage de chaque réservoir nécessite un énorme investissement en temps. Dans la plupart des études régionales, la recherche est effectuée pour des sites sélectionnés et est ensuite extrapolée pour toute la région suivant certaines hypothèses. L'agrégation des données à partir de ces sources présente deux problèmes majeurs : les données pour chaque pays dans cette région peuvent ne pas être disponibles, et, en raison d'une méthodologie et d'hypothèses qui peuvent être différentes dans chaque étude, les données agrégées peuvent ne pas mener à des estimations correctes de la capacité de stockage. Les capacités de stockage estimées pour chaque pays en utilisant ces références peuvent en outre ne pas être exactes car de nombreux petits sites de stockage ont été négligés. C'est la raison pour laquelle nous avons appliqué une méthodologie uniforme pour chaque région pouvant être comparée et agrégée. Il faut également tenir compte du fait que pour planifier correctement les projets CSC, il est important de disposer d'estimations du potentiel de stockage mais aussi de la chronologie de leur disponibilité.

Les estimations des potentiels de stockage dans ce travail font référence à une capacité de stockage effective tenant compte des contraintes géologiques et d'ingénierie. Les gisements de gaz qui ont à la fois des réservoirs localisés en onshore et en offshore ont été classés dans une catégorie « mixtes » puis classés in fine dans la nouvelle base de données comme étant en onshore. Une autre limite identifiée dans la revue de données disponibles concerne les gisements pétroliers. En dehors des données d'Hendricks, aucune des références ne présente des données sur le stockage du CO<sub>2</sub> dans les gisements épuisés de pétrole sans EOR, voire dans la plupart des références, les gisements épuisés de pétrole sont synonymes de EOR. Concernant l'ECBM, les nouvelles données sont moins optimistes que les autres sources, à l'exception de données de Dooley. En outre, aucune des références identifiées ne fournit d'informations sur la profondeur du site de stockage. Il est donc impossible de classer les estimations de stockage comme cela a été développé dans les sources initiales du modèle, à savoir suivant une profondeur inférieure à 1000 m ou supérieure à 1000 m. Nous avons donc considéré une répartition à part égale, comme c'était le cas initialement. Les aquifères salins profonds présentent un énorme potentiel de stockage mais, dans toutes les sources étudiées, ils sont également les moins renseignés précisément. Notamment aucune des sources référencées n'inclut une distinction entre une localisation onshore ou offshore. Nous avons donc finalement choisi la répartition de Dooley pour les études de mises à jour des données de TIAM-FR.

Finalement, j'ai spécifié un scénario dans lequel l'utilisateur peut choisir entre différentes sources de potentiels de stockage de carbone. Une analyse de sensibilité peut alors être menée. Plus précisément, 6 options sont proposées :

- Les données initiales du modèle, avec l'intégration de la distinction onshore/offshore pour les sites où elle n'était pas établie : le potentiel mondial total de stockage atteint 9 392 Gt, essentiellement constitué des aquifères salins profonds onshore et offshore ;
- Les données de Hendricks (2004), suivant ses hypothèses basses : le potentiel mondial total de stockage atteint 572 Gt, venant essentiellement de gisements épuisés de pétrole onshore et de gisements épuisés de gaz onshore et offshore ;
- Les données de Hendricks (2004), suivant ses hypothèses moyennes (un « best » scenario) : le potentiel mondial total de stockage atteint 1 706 Gt, provenant principalement de gisements épuisés de gaz onshore et offshore ;
- Les données de Hendricks (2004), suivant ses hypothèses hautes : le potentiel mondial total de stockage atteint 8 864 Gt, plus ou moins bien réparti entre les différents types de site même si les gisements épuisés de gaz onshore et offshore demeurent les plus représentés ;
- Les estimations de Dooley (2005) : le potentiel mondial total de stockage atteint 10 655 Gt, essentiellement constitué des aquifères salins profonds onshore et offshore ;
- Une compilation des estimations reprenant les diverses sources identifiées et la méthodologie précisée précédemment : le potentiel mondial total de stockage atteint 10 142 Gt, essentiellement constitué des aquifères salins profonds onshore et offshore. A noter qu'au début de cette expertise, j'escomptais atteindre un potentiel global bien moindre.

Les tables ci-dessous présentent les différents potentiels implémentés dans le modèle.

Table 3: Potentiel de stockage du carbone par type de site et par localisation

### 3a. Données initiales de TIAM-FR model

Carbon storage (Gt)	AFR	AUS	CAN	CHI	CSA	EEU	FSU	IND	JPN	MEA	MEX	ODA	SKO	USA	WEU	World
EOR (Onshore)	1.3	0.0	2.5	0.8	3.1	1.5	13.2	0.0	0.0	32.4	0.4	0.0	0.0	6.8	0.0	62
EOR (Offshore)	1.3	0.0	0.0	0.0	4.4	0.0	1.8	0.0	0.0	5.1	0.0	1.1	0.0	0.7	0.4	15
Depl. Oil Fields (Onshore)	2.6	0.0	2.5	0.8	7.5	1.5	22.5	0.0	0.0	56.3	3.8	7.5	0.0	7.5	0.4	113
Depl. Gas Fields (Onshore)	10.5	0.8	10.0	0.0	22.5	0.0	168.0	0.0	0.0	150.0	7.5	22.5	0.0	7.5	11.3	411
Depl. Oil Fields (Offshore)	1.5	0.8	0.5	0.2	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	2.3	1.1	0.0	7.5	3.0	26
Depl. Gas Fields (Offshore)	3.8	6.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.5	7.5	15.0	0.0	7.5	22.5	105
Coalbed Meth. Rec. <1000m	3.8	15.0	7.5	8.0	0.0	1.3	12.5	4.0	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	45.0	6.0	115
Coalbed Meth. Rec. >1000m	3.8	15.0	7.5	8.0	0.0	1.3	12.5	4.0	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	45.0	6.0	115
Deep saline aquifer (Onshore)	337	151	534	455	773	227	211	250	0	469	125	402	5	750	85	4772
Deep saline aquifer (Offshore)	663	349	133	45	227	23	789	250	5	31	125	598	5	250	165	3659
TOTAL	1029	538	702	518	1039	256	1231	508	5	789	271	1071	10	1128	300	9392

### 3b. Données issues de Hendricks (2004) – Low scenario

Storage site	AFR	AUS	CAN	CHI	CSA	EEU	FSU	IND	JPN	MEA	MEX	ODA	SKO	USA	WEU	World
EOR (Onshore)	0.5	0.0	0.0	0.2	0.8	0.1	1.7	0.0	0.0	5.1	0.0	0.1	0.0	0.8	0.0	9
EOR (Offshore)	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.2	0.1	0.0	0.8	0.0	0.1	0.0	0.1	0.3	3
Depl. Oil Fields (Onshore)	2.6	0.0	2.5	0.8	7.5	1.5	22.5	0.0	0.0	56.3	3.8	7.5	0.0	7.5	0.4	113
Depl. Gas Fields (Onshore)	15.2	0.1	6.7	4.0	9.9	2.9	71.3	4.1	0.0	92.6	0.0	2.9	0.0	7.8	5.0	223
Depl. Oil Fields (Offshore)	1.5	0.8	0.5	0.2	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	2.3	1.1	0.0	7.5	3.0	26
Depl. Gas Fields (Offshore)	7.4	7.2	0.7	0.3	10.9	0.0	26.1	1.9	0.0	70.6	0.0	19.1	0.0	1.9	23.2	169
Coalbed Meth. Rec. <1000m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Coalbed Meth. Rec. >1000m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Deep saline aquifer (Onshore)	2.1	1.1	1.8	1.5	2.9	0.4	0.9	1.4	0.0	1.1	0.0	0.3	0.0	1.7	0.4	15
Deep saline aquifer (Offshore)	4.0	2.4	0.4	0.2	0.9	0.0	3.2	1.4	0.2	0.1	0.0	0.5	0.0	0.5	0.9	15
TOTAL	34	12	13	7	35	5	126	9	0	234	6	32	0	28	33	572

### 3c. Données issues de Hendricks (2004) – Best scenario

Storage site	AFR	AUS	CAN	CHI	CSA	EEU	FSU	IND	JPN	MEA	MEX	ODA	SKO	USA	WEU	World
EOR (Onshore)	6.2	0.0	0.4	3.0	10.4	0.9	21.8	0.4	0.0	62.0	0.0	1.0	0.0	6.2	0.1	112
EOR (Offshore)	8.1	0.5	0.3	0.5	8.6	0.0	2.9	0.6	0.0	9.3	0.0	1.4	0.0	0.5	4.0	37
Depl. Oil Fields (Onshore)	2.6	0.0	2.5	0.8	7.5	1.5	22.5	0.0	0.0	56.3	3.8	7.5	0.0	7.5	0.4	113
Depl. Gas Fields (Onshore)	37.6	0.3	14.7	11.7	28.3	6.8	197.3	13.4	0.0	260.4	0.0	9.8	0.0	13.7	15.4	609
Depl. Oil Fields (Offshore)	1.5	0.8	0.5	0.2	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	2.3	1.1	0.0	7.5	3.0	26
Depl. Gas Fields (Offshore)	17.8	17.3	0.8	0.4	25.0	0.0	73.5	5.2	0.0	85.7	0.0	34.9	0.0	2.1	38.8	302
Coalbed Meth. Rec. <1000m	3.8	5.7	4.3	79.0	1.0	0.4	12.5	1.0	0.1	0.0	0.0	9.5	0.0	15.9	0.5	133
Coalbed Meth. Rec. >1000m	3.8	5.7	4.3	79.0	1.0	0.4	12.5	1.0	0.1	0.0	0.0	9.5	0.0	15.9	0.5	133
Deep saline aquifer (Onshore)	16.2	8.5	13.9	12.2	23.4	3.1	7.0	10.6	0.0	9.1	0.0	2.6	0.0	13.0	3.5	123
Deep saline aquifer (Offshore)	31.8	19.6	3.4	1.2	6.9	0.3	26.0	10.6	1.9	0.6	0.0	3.8	0.0	4.3	6.8	117
TOTAL	129	58	45	188	114	13	376	43	2	491	6	81	0	87	73	1706

### 3d. Données issues de Hendricks (2004) – High scenario

Storage site	AFR	AUS	CAN	CHI	CSA	EEU	FSU	IND	JPN	MEA	MEX	ODA	SKO	USA	WEU	World
EOR (Onshore)	42.4	0.2	3.1	23.0	67.3	5.1	132.4	2.1	0.0	405.8	0.0	6.0	0.0	44.5	1.1	733
EOR (Offshore)	85.0	5.0	3.2	3.4	72.9	0.0	19.3	3.0	0.0	61.1	0.0	10.9	0.0	4.8	39.9	309
Depl. Oil Fields (Onshore)	2.6	0.0	2.5	0.8	7.5	1.5	22.5	0.0	0.0	56.3	3.8	7.5	0.0	7.5	0.4	113
Depl. Gas Fields (Onshore)	73.4	0.7	18.3	31.3	72.6	8.5	457.8	33.5	0.0	540.7	0.0	24.9	0.0	23.0	29.1	1314
Depl. Oil Fields (Offshore)	1.5	0.8	0.5	0.2	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	2.3	1.1	0.0	7.5	3.0	26
Depl. Gas Fields (Offshore)	47.9	40.7	1.3	1.1	89.8	0.0	292.6	14.1	0.0	117.7	0.0	65.7	0.0	3.3	135.6	810
Coalbed Meth. Rec. <1000m	23.0	27.1	25.5	420.4	5.9	2.1	75.1	6.0	0.3	0.0	0.0	57.0	0.0	95.1	2.9	740
Coalbed Meth. Rec. >1000m	23.0	27.1	25.5	420.4	5.9	2.1	75.1	6.0	0.3	0.0	0.0	57.0	0.0	95.1	2.9	740
Deep saline aquifer (Onshore)	72.8	38.0	62.2	54.8	105.2	13.8	31.3	47.8	0.0	40.9	0.0	11.6	0.0	58.2	15.8	552
Deep saline aquifer (Offshore)	143.4	88.3	15.5	5.5	30.9	1.4	117.2	47.8	8.4	2.7	0.0	17.2	0.0	19.4	30.9	528
TOTAL	515	228	158	961	459	35	1223	160	9	1233	6	259	0	358	261	5864

### 3e. Données issues de Dooley et al. (2005)

Storage site	AFR	AUS	CAN	CHI	CSA	EEU	FSU	IND	JPN	MEA	MEX	ODA	SKO	USA	WEU	World
EOR (Onshore)	6.4	0.0	0.0	3.2	8.0	0.0	19.4	0.0	0.0	28.7	0.0	1.5	0.0	10.2	0.2	78
EOR (Offshore)	8.3	0.0	0.0	0.5	6.7	0.0	2.6	0.0	0.0	4.3	0.0	2.2	0.0	0.8	7.1	32
Depl. Oil Fields (Onshore)	2.6	0.0	2.5	0.8	7.5	1.5	22.5	0.0	0.0	56.3	3.8	7.5	0.0	7.5	0.4	113
Depl. Gas Fields (Onshore)	42.3	0.2	3.5	7.1	25.3	7.3	187.0	5.3	0.0	143.5	0.0	6.4	0.0	31.8	11.5	471
Depl. Oil Fields (Offshore)	1.5	0.8	0.5	0.2	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	2.3	1.1	0.0	7.5	3.0	26
Depl. Gas Fields (Offshore)	20.0	10.8	0.2	0.2	22.4	0.0	69.7	2.0	0.0	47.2	0.0	22.9	0.0	4.9	28.8	229
Coalbed Meth. Rec. <1000m	3.7	14.7	1.9	7.4	1.9	1.9	9.2	3.7	0.0	0.0	0.0	12.9	0.0	29.4	1.9	88
Coalbed Meth. Rec. >1000m	3.7	14.7	1.9	7.4	1.9	1.9	9.2	3.7	0.0	0.0	0.0	12.9	0.0	29.4	1.9	88
Deep saline aquifer (Onshore)	117	205	1001	330	187	106	370	187	0	224	0	121	0	2732	73	5654
Deep saline aquifer (Offshore)	231	477	249	33	55	11	1386	187	0	15	0	180	0	909	143	3876
TOTAL	437	723	1261	390	317	130	2076	389	0	526	6	368	0	3762	271	10655

### 3f. Compilation des données issues de la revue de littérature

Storage site	AFR	AUS	CAN	CHI	CSA	EEU	FSU	IND	JPN	MEA	MEX	ODA	SKO	USA	WEU	World
EOR (Onshore)	5.2	0.0	1.7	3.8	3.9	0.6	19.1	0.4	0.0	55.3	4.6	0.0	0.0	15.4	0.0	110
EOR (Offshore)	5.4	0.3	0.0	0.0	5.6	0.0	2.6	0.5	0.0	8.8	0.0	0.9	0.0	1.6	4.0	30
Depl. Oil Fields (Onshore)	2.6	0.0	2.5	0.8	7.5	1.5	22.5	0.0	0.0	56.3	3.8	7.5	0.0	7.5	0.4	113
Depl. Gas Fields (Onshore)	17.0	0.0	12.0	7.0	29.0	5.0	202.0	0.0	0.0	31.0	0.0	8.0	0.0	33.0	0.0	344
Depl. Oil Fields (Offshore)	1.5	0.8	0.5	0.2	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	2.3	1.1	0.0	7.5	3.0	26
Depl. Gas Fields (Offshore)	15.0	18.0	0.0	1.0	14.0	0.0	53.0	1.0	0.0	114.0	1.0	38.0	0.0	7.0	56.0	318
Coalbed Meth. Rec. <1000m	3.4	15.0	2.0	6.4	2.5	0.3	9.5	2.5	5.0	0.0	0.0	12.0	0.0	30.5	0.3	89
Coalbed Meth. Rec. >1000m	3.4	15.0	2.0	6.4	2.5	0.3	9.5	2.5	5.0	0.0	0.0	12.0	0.0	30.5	0.3	89
Deep saline aquifer (Onshore)	7	204	22	331	1545	16	443	32	0	9	50	483	0	1738	26	4907
Deep saline aquifer (Offshore)	13	475	6	33	455	2	1657	32	47	1	50	717	0	578	51	4117
TOTAL	74	728	49	389	2067	25	2418	70	57	283	112	1279	0	2449	142	10142

Dans une seconde étape, bien que la capture représente la partie la plus coûteuse de la CSC, à hauteur de 80% voire plus, nous avons exploré les différents coûts de transport du carbone disponibles dans la littérature en vue d'une implémentation éventuelle dans le modèle (Knoope et al. 2013; IEA GHG

2010; Friedman et al. 2006; Edenhofer et al. 2010; Bock et al. 2003; Dahowski et al. 2011; McKinsey 2008; Jung et al. 2013; ZEP reports; Fidje et al. 2010). De plus, en raison de la classification onshore ou offshore, nous avons cherché à distinguer ces coûts de transport suivant la localisation des sites de stockage. Les dépenses en capital représentent la part principale des coûts spécifiques au site, en raison de diverses caractéristiques touchant au pipeline (en fonction du matériau, du volume de CO<sub>2</sub> transporté, et du diamètre) et de la topographie de la région. Pour l'essentiel, cependant, la variation des coûts dépend davantage de la localisation onshore/offshore que du type de site de stockage concerné. Un coefficient multiplicateur a cependant été appliqué au coût suivant les régions en se fondant sur les références de l'AIE (IEA GHG 2010) afin de prendre en compte les disparités régionales. Le modèle TIAM intègre également un coefficient régional, induisant notamment une augmentation des coûts en Afrique (pour tous les types de sites, sauf pour les aquifères salins profonds et l'ECBM), en ex-Union soviétique (pour l'EOR ou les gisements épuisés de gaz par exemple), en Amérique Centrale et du Sud (pour l'ECBM, l'EOR ou encore les anciens gisements de gaz et pétrole onshore), en Europe, au Japon et en Corée du Sud (pour l'ECBM). Les estimations des coûts de transport de CO<sub>2</sub> utilisés précédemment dans le modèle TIAM-FR sont plus élevées que celles rapportées dans les références identifiées dans ce travail, et il n'y a pas de différence entre le coût du transport onshore et offshore.

Table 4: Coûts de transport du carbone et coefficients régionaux

\$/t CO <sub>2</sub>	TIAM initial (base)	McKinsey (2008)	ZEP (2010)
Enhanced Oil Recovery (onshore)	10	5.2	2.77
Enhanced Oil Recovery (offshore)	10	7.8	4.47
Depleted oil fields (onshore)	10	5.2	2.77
Depleted gas fields (onshore)	10	5.2	2.77
Depleted oil fields (offshore)	10	7.8	4.47
Depleted gas fields (offshore)	10	7.8	4.47
Enhanced Coalbed Methane recovery <1000 m	10	5.2	2.77
Enhanced Coalbed Methane recovery >1000 m	10	7.8	2.77
Deep saline aquifers (onshore)	10	5.2	2.77
Deep saline aquifers (offshore)	10	7.8	4.47

Dans ce cadre également, j'ai spécifié un scénario dans lequel l'utilisateur peut choisir entre ces différentes sources de coûts de transport du carbone. Les références reprises pour notre implémentation et notre analyse de sensibilité sont les estimations de ZEP (2011) pour une approche optimiste et de McKinsey & Cie (2008) (Table 4). Bien que ces références concluent qu'il est très difficile de généraliser le coût du transport de CO<sub>2</sub>, car il est dépendant du site et du projet, il est intéressant d'avoir une estimation moyenne afin de voir l'influence éventuelle à imputer aux coûts de transport.

Ces nouveaux paramétrages ont dans un premier temps été fournis à l'ETSAP comme amélioration du modèle ETSAP-TIAM dans le cadre de la collaboration internationale conduite pour développer et pérenniser le modèle de l'ETSAP. Ils m'ont ensuite permis de mener une première étude sur le rôle des potentiels de stockage et des coûts de transport du carbone dans le développement de la filière CSC. Ceci en situation de contrainte climatique induisant de fait une réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Plus précisément, dans ce cas précis, j'ai analysé comment le mix électrique mondial évoluerait si le système énergétique devait suivre une trajectoire de réduction des émissions de GES répondant à une

limitation du forçage radiatif de 2,6 W/m<sup>2</sup>, sans dépassement permis, sur la période 2005-2100. Cette contrainte est en cohérence avec un objectif de limitation de l'augmentation de la température globale de 2°C. J'ai ainsi analysé cette contrainte climatique dans chacune des situations de stockage de carbone relevée et implémentée. Les différents scénarios ont ainsi été nommés :

- Clim\_ini, suivant les données initiales du modèle ;
- Clim\_HenL, suivant les estimations basses de Hendricks (2004) ;
- Clim\_HenB, suivant les estimations moyennes Hendricks (2004) ;
- Clim\_HenH, suivant les estimations hautes Hendricks (2004) ;
- Clim\_Doo, suivant les estimations de Dooley (2005) ;
- Clim\_Misc, suivant la compilation des estimations.

Il en résulte qu'en dehors des résultats du scénario de Clim\_HenL où le potentiel de stockage de carbone est le plus faible voire très faible en comparaison avec les autres scénarios, en général, le développement des technologies de CSC en 2050 ne semble pas être affecté par le niveau de potentiel de carbone. Cependant, dans le cas d'un faible niveau de potentiel de stockage de carbone, en d'autres termes dans tous les scénarios de Clim\_Hen, le développement CSC est plus faible à la fin de la période que dans les autres scénarios (Table 5). Ceci est particulièrement intéressant compte tenu du fait que les facteurs techniques, économiques, sociaux et juridiques peuvent influencer sur le niveau de potentiel de stockage du carbone. De plus amples investigations vont être menées, notamment en étendant l'horizon temporel, pour déterminer si la contrainte potentielle peut être saturée. Ceci confortant l'idée selon laquelle l'option de la CSC serait une solution de transition dans l'enjeu de décarbonisation des systèmes énergétiques.

Table 5: Electricity mix (%) by scenario

Scenario	Period	Coal	Gas and Oil	CCS	Nuclear	Hydro	Geo and Tidal	Solar PV	Solar Thermal	Wind
Clim_ini	2050	0.3	2.2	<b>19.5</b>	15.4	10.7	1.4	32.9	5.5	11.1
	2100	0.0	0.0	<b>23.9</b>	13.1	9.0	10.1	27.9	5.1	10.3
Clim_Doo	2050	0.3	1.0	<b>23.7</b>	14.6	10.3	1.2	32.2	5.4	10.6
	2100	0.0	0.1	<b>23.0</b>	13.2	9.1	10.0	29.0	5.2	9.9
Clim_Misc	2050	0.3	2.9	<b>18.5</b>	14.6	10.4	1.5	34.2	5.4	11.2
	2100	0.0	0.1	<b>22.6</b>	13.1	9.7	10.0	28.8	5.2	9.9
Clim_HenL	2050	0.2	5.4	<b>10.5</b>	16.0	11.3	1.8	35.4	6.7	11.9
	2100	-	4.9	<b>6.8</b>	10.8	11.5	8.9	37.4	4.2	13.9
Clim_HenB	2050	0.3	1.4	<b>21.7</b>	14.6	10.4	1.4	33.4	5.4	10.6
	2100	-	1.2	<b>17.4</b>	13.0	11.1	9.9	29.6	5.1	11.9
Clim_HenH	2050	0.3	0.7	<b>24.2</b>	14.5	10.2	1.1	32.2	5.3	10.6
	2100	0.0	0.0	<b>23.6</b>	13.3	8.8	9.8	28.9	5.2	10.0

Par contre, le type de site de stockage semble avoir un impact plus important, avec un arbitrage entre les aquifères salins profonds et anciens gisements et la récupération assistée de pétrole. Ces derniers ont tendance à être davantage exploités quand le potentiel de stockage de carbone est plus faible (dans les scénarios Clim\_HenX encore une fois). Pour une analyse plus approfondie, une approche régionale sera intéressante à mener, en particulier pour la Chine, où le développement de la CSC peut être particulièrement significatif lorsque l'on considère une croissance continue de la consommation d'énergie et la dépendance de son mix énergétique au charbon, même si des efforts considérables ont

été faits pour promouvoir les énergies renouvelables et améliorer l'efficacité énergétique (Zhu et al. 2015).

La question du coût du transport du carbone a également été traitée. Au vu des différentes séries de données implémentées, ce dernier ne semble pas, dans ce contexte et dans une perspective globale, limiter la pénétration des technologies de capture du carbone. Par contre, il impacte visiblement le choix du site. Notamment, un coût plus élevé de transport de CO<sub>2</sub> semble être préjudiciable au stockage dans les gisements épuisés de gaz et EOR à la fin de la période. Enfin, le stockage du carbone se localise alors principalement dans les sites onshore. En poussant plus loin l'analyse de la localisation des sites suivant une répartition onshore/offshore, j'ai imposé une interdiction du stockage onshore, en vue de représenter une politique fictive tenant compte de la résistance publique envers le stockage du CO<sub>2</sub> sur le territoire. En effet, la perspective de développement du stockage du carbone implique une certaine résistance du public en raison d'une crainte de risques de fuite, et par conséquent une crainte de conséquences sanitaires néfastes. Une autre crainte réside dans le fait qu'en cas de fuites de CO<sub>2</sub> provenant du réservoir de stockage, les efforts pour lutter contre le changement climatique seraient réduits à néant. Dans cette optique, l'Agence internationale de l'énergie, dans son Energy Technology Perspectives 2016 (AIE, 2016) met en évidence l'importance de la surveillance et de vérification appropriées pour assurer l'efficacité du stockage du carbone. Pour caractériser ce problème d'acceptabilité sociale et limiter le développement des sites de stockage « visibles », le stockage offshore reste ainsi le seul possible et les potentiels sont donc drastiquement réduits. La question demeure de savoir si une telle position politique pourrait avoir un impact significatif sur la pénétration de la CSC, toujours dans un contexte fortement contraint climatiquement. Il en résulte un investissement réduit dans les solutions de CSC. Alors que jusqu'à 24 % de l'électricité mondiale pouvait être produite par des centrales équipées de technologies de capture du carbone dans les scénarios impliquant des sites onshore et offshore, cette part descend à 13 %, que ce soit en 2050 ou en 2100 dans un contexte de limitation des sites de stockage. A titre d'information, cela implique de stocker 7,5 Gt par an de carbone en 2050 et 18 Gt par an de carbone en 2100. Dans les scénarios sans contraintes de localisation des sites de stockage, 10 Gt par an de carbone devaient alors être stockées en 2050 (6 Gt par an pour le scénario présentant les potentiels les plus faibles) et entre 26 et 37 Gt par an en 2100 (entre 5 Gt et 19 Gt par an pour le scénario présentant les potentiels les plus faibles). D'après les résultats, ce plus faible recours au CSC apparaît être davantage dû à un coût plus élevé du stockage qu'à un niveau réduit de potentiel de stockage.

Ces travaux ont également été présentés lors de la 37<sup>ème</sup> IAEE International Conférence, en 2014, à New York City et ont fait l'objet d'un article qui a été accepté pour publication en 2016 dans la revue Applied Energy.

## **2. Capture et séquestration du carbone appliquées aux filières biomasses : la question des émissions négatives de carbone**

Les challenges entourant le changement climatique impliquent de totalement repenser le système énergétique mondial, en particulier le mix technologique qui satisfera les demandes énergétiques en ligne avec les défis et les politiques climatiques. Le progrès technologique doit ainsi trouver une réponse adéquate aux ambitions des pays d'étendre le portefeuille de technologies disponibles (ou à venir) et leur potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Parmi ces options de décarbonisation, les technologies de CSC sont présentées comme une solution potentielle, pour ne pas

dire attendue et nécessaire, permettant d'atteindre des objectifs ambitieux (Rai et al. 2010 ; Azar et al. 2006). Par ailleurs, un pan de littérature croissant évalue l'atteinte d'objectifs élevés de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de par le déploiement à une échelle industrielle de la CSC et de la combinaison de ces technologies avec le recours croissant à la ressource biomasse (Tokimatsu et al 2016). En effet, la capture et séquestration du carbone appliquée aux bioénergies (BCSC) connaît une attention grandissante dans la mesure où elle constitue une opportunité de bénéficier d'émissions négatives, autrement dit d'une suppression nette du carbone de l'atmosphère tout en satisfaisant les besoins en énergie (Obersteiner et al. 2001). Les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de la combustion ou de la transformation de la biomasse qui sont capturées sont en effet comptabilisées comme négatives dans la mesure où les émissions résultant de l'utilisation de la biomasse sont elles-mêmes considérées comme neutres pour le système (en raison de l'assimilation du carbone au CO<sub>2</sub> atmosphérique via la photosynthèse) (Figure 8). On notera que ceci n'est vrai qu'en cas de gestion soutenable de la biomasse. Quand des cibles élevées de réduction du carbone sont envisagées, les émissions négatives apparaissent comme une option rentable (Azar et al. 2006, 2010; Katofsky et al. 2010; Luckow et al. 2010; van den Broek et al. 2011; van Vuuren et al. 2007, 2009).

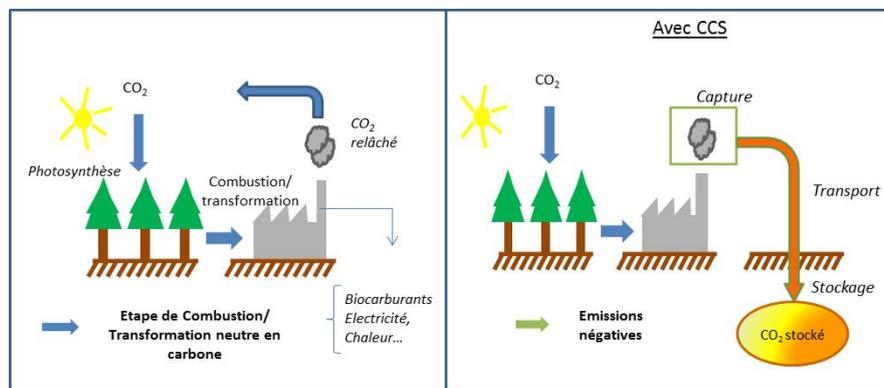


Figure 8 : Biomasse et capture du carbone (Ricci, 2012).

Comme évoqué précédemment, TIAM-FR intègre plusieurs technologies de capture et de séquestration du carbone liées aux ressources fossiles ou à la bioénergie. Le but du processus de capture est d'obtenir un flux gazeux à forte concentration en CO<sub>2</sub> presque pur à haute pression. Il existe trois modes de capture de CO<sub>2</sub> à partir de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) dans le modèle : 1) la post-combustion qui utilise une variété de procédés tels que l'absorption ou la séparation par membranes, 2) la pré-combustion avec conversion de l'énergie chimique en H<sub>2</sub>, suivie de la séparation simultanée du carbone à faible coût et 3) l'oxycombustion, caractérisée par un faible coût de séparation du CO<sub>2</sub>, mais nécessitant une alimentation en O<sub>2</sub>. Pour les centrales biomasses, deux technologies de capture sont implémentées : la capture en pré-combustion pour le procédé de gazéification de la biomasse, et la capture en post-combustion pour la combustion directe de la biomasse. Les technologies CSC sont supposées être disponibles à partir de 2020. Ces deux types de centrales fonctionnent uniquement à la biomasse qui peut dans ce cas être solide (bois) ou issue de cultures.

Afin de travailler plus précisément sur cette question du développement de la BCSC<sup>17</sup>, de nouvelles technologies ont été intégrées dans le modèle, et en particulier des centrales électriques à combustion combinée charbon-biomasse, avec ou sans technologie de capture du carbone. Il n'y en avait en effet pas dans le modèle TIAM, à la différence des centrales biomasse avec et sans capture du carbone, qui étaient déjà bien représentées dans le modèle. Concernant les technologies de conversion de biomasse en bioénergies, de nouvelles technologies équipées de capture de carbone ont été également ajoutées au modèle. Dans le secteur des transports et concernant la filière de production des biocarburants, l'implémentation de technologies de CSC a également été travaillée même si cette recherche était essentiellement centrée sur le secteur de l'électricité. Trois autres technologies ont alors été créées et implémentées : une centrale à co-combustion (chauffage pressurisé au charbon pulvérisé) et deux centrales à co-gazéification (la gazéification intégrée à cycle combiné (IGCC), à air ou air enrichi en oxygène) utilisant toutes les trois un mélange de charbon et de biomasse (à hauteur de 20% mais pouvant être ajuster par l'utilisateur). Ces trois mêmes technologies ont été équipées de procédé de capture de carbone et ajoutées au modèle. Pour chaque technologie, plusieurs paramètres technico-économiques ont été renseignés comme c'est le cas pour les autres technologies, tels que les coûts d'investissement, les coûts d'opération et de maintenance, la durée de vie de la technologie, le rendement, la date à laquelle elle sera développée. Différentes données relatives aux émissions évitées ont également été intégrées s'agissant des centrales avec et sans CSC. Une fois ces diverses technologies de BSCS implémentées et calibrées, des scénarios de contraintes technologiques ont été développés interdisant soit le recours à la BSCS (tous secteurs confondus) avec ou sans recours possible à la CSC dans les centrales électriques combinées charbon-biomasse, soit le recours à la CSC. Différentes analyses ont ensuite été menées dans le cas de la mise en œuvre de politiques climatiques visant à réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. L'objectif de ces approfondissements était d'étudier le déploiement des technologies BSCS dans les secteurs électriques mondial et régionaux dans le cas de plus ou moins fortes contraintes de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et d'en évaluer le potentiel.

Dans une étude qui a notamment été publiée dans la revue Energy en 2014 (Article annexé n°1), le modèle répond à la contrainte climatique (soit plus précisément un forçage radiatif limité à 2,6 W/m<sup>2</sup> dans un premier cas et à 3,7 W/m<sup>2</sup> dans un second cas) par un déploiement à grande échelle des technologies de CSC dans le secteur électrique à partir de 2030. 30 % de l'électricité produite en 2050 provient alors de centrales équipées de technologies de capture. Au niveau mondial, 50 % des centrales CSC déployées fonctionnent avec de la biomasse, s'agissant des 50 % fonctionnant avec des ressources fossiles, on note une prépondérance de centrales charbon. L'analyse régionale met en avant que c'est pour les pays industrialisés que les technologies de capture des centrales biomasse ont le plus de pertinence technico-économique alors que dans les pays à croissance rapide comme la Chine, ce sont les centrales charbon avec CSC qui seront prédominantes<sup>18</sup>. Ce qui a du sens au vu de leur système énergétique actuel. Dans les pays en développement, la pénétration de technologies de capture

---

<sup>17</sup> Ce travail a été réalisé en collaboration avec Olivia Ricci, alors doctorante au Laboratoire d'Economie d'Orléans, qui travaillait sur la capture et stockage géologique du CO<sub>2</sub> à partir de biomasse et notamment sur les incitations économiques à mettre en place pour assurer son développement. Elle a construit un modèle d'équilibre général calculable utilisé pour évaluer les politiques environnementales en introduisant les technologies de CSC et de BCSC ainsi qu'une large variété d'instruments économiques dont elle a comparé l'efficacité économique au niveau mondial et au niveau français.

<sup>18</sup> On rappellera que de manière générale, il s'agit d'une détermination optimale du modèle et que reste ensuite bien sûr la question de savoir si ces pays investiront effectivement ou pas, cela ne dépendant pas uniquement de critères technico-économiques.

des centrales biomasse varie selon les pays. L'Afrique, l'Amérique Centrale et du Sud répondront davantage à la contrainte climatique en investissant dans des centrales biomasse avec capture alors qu'au Moyen-Orient et en Russie (ex-Union Soviétique plus exactement), ce sont principalement des centrales électriques au gaz qui seront équipées de technologies de capture afin de satisfaire à la contrainte de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Confronté à des limitations quant aux investissements réalisés dans des technologies de capture et séquestration du carbone, les résultats montrent qu'avec une contrainte spécifique sur le développement des filières CSC, en d'autres termes l'interdisant, la part des énergies renouvelables et de l'énergie nucléaire devient très importante pour atteindre l'objectif climatique, ces dernières permettant de décarboner le secteur électrique vu que le recours au CSC est limité et avec lui, le recours aux énergies fossiles. Dans le cas où la CSC est possible mais pas la BCSC, les technologies de combustion combinée charbon –biomasse tendent à être un bon substitut. Par contre, il est intéressant de noter que lorsque les technologies de co-combustion et la BCSC ne sont pas disponibles, la part de la CSC dans le mix électrique diminue de manière significative en 2100. Ainsi, la CSC (permis sur les centrales électriques fonctionnant avec des combustibles fossiles) ne compense pas l'absence de technologies permettant de comptabiliser des émissions négatives de carbone.

Une autre étude, publiée dans Energy Policy en 2013 (Article annexé n°2), met en avant l'intérêt de discuter des potentiels régionaux de la bioélectricité avec option de capture de CO<sub>2</sub>. En effet, la plupart des études mettant en évidence l'opportunité que représente la BSCS (et citées précédemment) estiment le potentiel global de BSCS permettant la réduction ciblée des émissions en supposant que toutes les régions du monde agissent ensemble en vertu d'une politique commune. Mais que se passe-t-il dans le cas, plus réaliste, où les régions ont des préoccupations différentes en termes de politiques climatiques et environnementales ? Ce travail a ainsi consisté à évaluer le potentiel global et régional de la BSCS dans le secteur électrique à l'horizon 2050, toujours en situation de mise en œuvre de politiques climatiques incitant à s'engager dans une transition vers un système énergétique bas carbone. Dans un premier temps, les scénarios climatiques étudiés (à savoir la mise en œuvre de l'Accord de Copenhague à horizon 2020 combinée à une cible relativement ambitieuse pour 2050 d'une part et un scénario visant le respect d'une limitation de la hausse de la température globale à 2°C) conduisent à un important développement des énergies renouvelables ainsi que des technologies de CSC et de BSCS dans le secteur électrique. Ces dernières représentent ainsi en 2050 entre 23 % et 30 % de la production d'électricité, ce qui conforte l'idée selon laquelle, même si les énergies renouvelables joueront un rôle majeur dans la transition vers un système décarboné, il est essentiel que les initiatives qui les favorisent soient mises en œuvre rapidement. Au regard de la dépendance actuelle envers le charbon, la CSC apparaît en effet comme une technologie déterminante pour réduire considérablement les émissions tout en répondant à une demande croissante en énergie. La BSCS joue un rôle important dans la mesure où dans le scénario le plus contraignant environ 70 % de la CSC est représentée par des centrales biomasse ; elle représente encore 40 % dans le scénario moins sévère. Pour autant, l'utilisation de la CSC et de la BCSS reste fortement dépendante des ressources en combustibles fossiles et biomasse des différents pays. Ainsi, la CSC associée à des centrales utilisant des ressources fossiles est principalement développée dans les pays à croissance rapide qui sont bien dotés en charbon, comme en Chine. En ce qui concerne l'utilisation de la BSCS, elle apparaît mieux répartie dans la mesure où les ressources biomasse sont plus largement disponibles dans toutes les régions (23 % en Chine, 17 % en Inde, 14 % aux États-Unis, 13 % en Asie du Sud-Est, 7 % en

Amérique Centrale et du Sud, en Europe de l'Ouest et en Afrique, 4 % dans l'ancienne Union soviétique, 3 % en Europe de l'Est et 1 % en Australie, Canada, Japon, Corée du Sud et au Moyen-Orient).

Ce travail de développement fournit un cadre nécessaire pour évaluer l'impact des politiques énergétiques et climatiques sur le déploiement mondial et régional des technologies de CSC, notamment dans le secteur de l'électricité. En particulier, il permet d'approfondir la discussion sur le rôle à jouer des pays, selon qu'ils soient industrialisés ou en développement, dans la réduction des émissions de GES, les technologies de CSC et BCSC étant un moyen d'y contribuer.

#### **D. Représentation régionale du modèle : Sous-régionalisation du secteur électrique africain et implémentation de la problématique de l'accès à l'énergie**

Le problème du changement climatique est certes un enjeu global appelant une mobilisation mondiale, pour autant la réponse demeure pour de nombreux aspects régionale et propre aux réalités économiques et énergétiques des pays. Le modèle TIAM-FR décrit le système énergétique du monde en quinze régions et ce découpage peut ne pas être le plus adapté suivant les problématiques énergétiques analysées ou le développement économique d'un pays. C'est le cas par exemple de la région Afrique qui présente d'importantes disparités et dont une des grandes préoccupations réside dans l'accès à l'énergie. Dans ce contexte, un travail de développement du modèle TIAM-FR a été entrepris et a porté sur le secteur électrique africain<sup>19</sup> en considérant les réalités énergétiques et économiques contrastées au sein du continent et l'enjeu d'accès à l'énergie. La restructuration régionale de l'Afrique a été réalisée de manière à tenir compte de la vitesse d'accès à l'énergie de ces régions, ouvrant ainsi d'intéressantes perspectives d'analyses.

Ainsi, par rapport à sa démographie, l'Afrique consomme peu d'énergie. Plus de 60 % de la population africaine n'a pas accès à l'énergie (commerciale) et utilise le bois (Favennec, 2009). La croissance attendue de la population et le développement de l'Afrique devraient conduire à des besoins fortement accrus en énergie. Paradoxalement, les ressources naturelles sont importantes, que ce soient des énergies fossiles ou des potentiels renouvelables (même s'ils restent largement inexploités à ce jour et qu'ils devraient en fin de compte être promus). Pour autant, le fait est que les réalités énergétiques et économiques sont contrastées au sein de l'Afrique (Table 6).

---

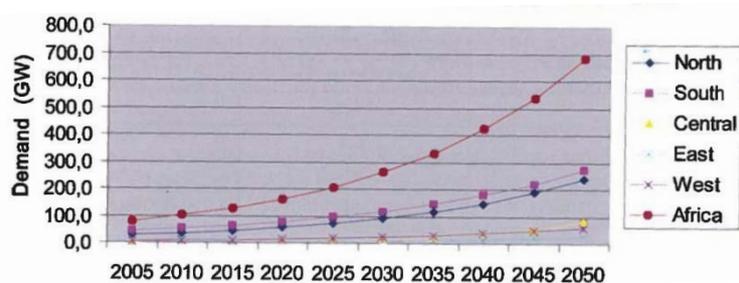
<sup>19</sup> Ce travail a, comme celui sur le potentiel de stockage du carbone, été implémenté dans la version ETSAP-TIAM. Il a été réalisé en collaboration avec Edi Assoumou, chargé de recherche au CMA.

Table 6 : Différentes réalités économiques et énergétiques au sein de l'Afrique

	Afrique	Afrique du Nord	Afrique Sub-Saharienne	Afrique du Sud
Population (millions; 2009)	1 030	169	810	50
PIB par habitant (US \$)	1 380	2 665	525	5 720
Consommation électrique (GWh)	446 150	138 325	105 825	202 000
Consommation électrique par habitant (KWh)	474	1 039	136	4 008
Capacités installées (GW) - Total	114	43	30	41
Capacités installées (GW) - Hydro	24	5	17	2
Potentiel - Hydro (GW)	201.3	7.2	192.6	1.5
Réserves - Gaz (Gm3)	14 893	8 079	6 795	19
Réserves - Charbon (Mt)	55 519	73	1 446	54 000
Réserves - Pétrole (Mbl)	125 000	60 900	64 100	-
Principaux projets de production d'électricité (engagés ou en construction et supérieurs à 300MW) selon African Energy (recensement Février 2010)				
Hydraulique	16 630	1 560	15 070	-
Solaire (thermique)	52 170	29 320	10 740	12 650
Eolien	300	-	300	-

Source: adapté de Heuroux, 2010.

Le mix électrique africain, bien que largement similaire aux autres continents, varie significativement d'une région à l'autre. L'Afrique du Nord et l'Afrique du Sud représentent 75 % de l'énergie consommée en Afrique, alors même que le reste de l'Afrique, l'Afrique sub-saharienne, représente les trois quart de la population. Les ressources et potentiels énergétiques sont également inégalement répartis en Afrique : pour ne citer que ces ressources, l'Afrique du Nord présente d'abondantes réserves de pétrole et de gaz et un important potentiel en solaire thermique à concentration (CSP), alors que l'Afrique sub-saharienne et l'Afrique du Sud présentent notamment et respectivement un potentiel hydroélectrique significatif et des réserves en charbon. La consommation électrique devrait croître de manière assez importante, mais particulièrement dans les régions Nord et Sud (Figure 9).



Source: WEC, 2007 suivant des données de 2004

Figure 9: Evolution de la consommation d'électricité en Afrique par sous-région

Par ailleurs en Afrique, l'accès à l'électricité est un problème majeur qui entrave gravement son développement. Elle constitue le continent le moins électrifié du monde ; l'Afrique représentant 15 % de la population mondiale, mais seulement 3 % de la consommation d'énergie. Une observation très frappante, mais là encore qualifiée par région, réside dans le fait que l'Afrique du Nord est électrifiée à plus de 90 %, et que l'Afrique du Sud représente à lui seul près de la moitié de l'électricité produite sur le continent. Reste l'Afrique sub-saharienne, hors Afrique du Sud, qui est le plus en retard avec 48 pays comptant pour 10 % de la population mondiale mais représentant l'équivalent électrique de la Pologne. Garantir l'accès à l'énergie est sans doute l'un des défis majeurs auxquels le monde est confronté aujourd'hui. Partant de ce constat, trois sous-secteurs électriques ont été implémentés afin d'apporter une meilleure représentation de la situation énergétique africaine :

- Afrique du Nord<sup>20</sup> ;
- Afrique sub-saharienne<sup>21</sup> ;
- Afrique du Sud.

Les données pour calibrer l'année de base du modèle proviennent des statistiques de l'AIE (IEA Energy statistic) comme pour les autres régions du modèle. Des scénarios de distribution sous-régionale de l'électricité africaine sur la période ont été développés selon la littérature et des hypothèses ont été intégrées en considérant la problématique du niveau d'accès à l'énergie des sous-régions. Plus précisément, afin de prendre en compte l'évolution de la répartition de la production électrique par sous-région, le raisonnement a été basé sur la croissance des niveaux de production d'électricité par habitant, permettant ainsi de remonter à l'évolution de l'accès à l'électricité. Nous avons ainsi d'abord examiné, en début de période, la production d'électricité par habitant et la répartition de la production d'électricité africaine par sous-région. Ensuite, nous avons déterminé l'évolution sur l'horizon temporel en fonction d'un coefficient de « vitesse de croissance » de la production par habitant, impliquant un impact sur la répartition de la production d'électricité en Afrique entre nos trois régions. Le schéma suivant (Figure 10) présente un des cas de figure de cette calibration avec des vitesses de croissance égales pour nos trois sous-régions. L'utilisateur est libre de modifier ces vitesses selon ses hypothèses.

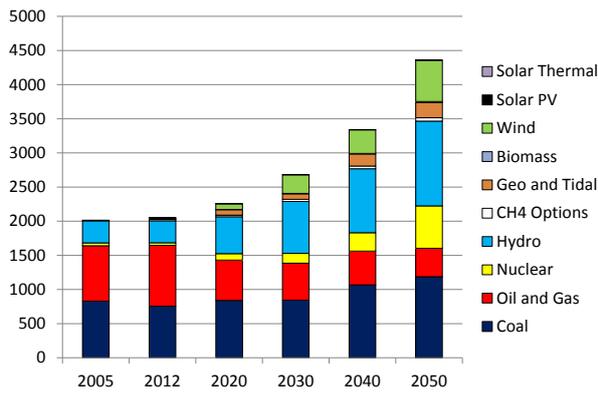
2005	Prod/habitant (kWh/habitant)	Répartition		Vitesse	Taux de croissance		2050	Prod/habitant (kWh/habitant)	Répartition
Nord	1 231	36 %	→	1	46,7 %	→	Nord	1 805	36 %
Sub-Sahara	164	21 %	→	1	46,7 %	→	Sub-Sahara	241	32 %
Sud	4 930	43 %	→	1	46,7 %	→	Sud	7 229	32 %
<b>AFRIQUE</b>	<b>601</b>	<b>100 %</b>					<b>AFRIQUE</b>	<b>639</b>	<b>100 %</b>

Figure 10: Scénario de vitesse d'accès à l'électricité identique

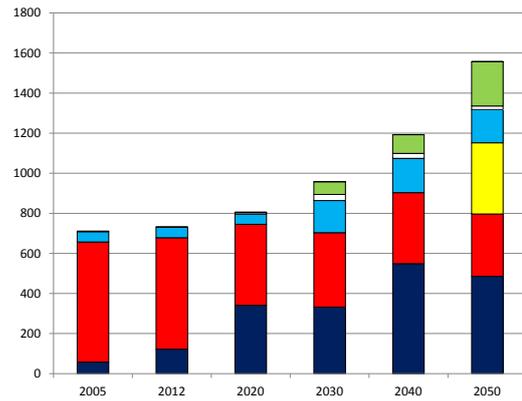
L'intérêt est ainsi de pouvoir analyser différents scénarios d'évolution de la production d'électricité par les sous-régions et de discuter de la question de l'accès à l'énergie en Afrique, compte tenu de l'impact de cette évolution sur le mix électrique africain. Les graphiques suivants montrent à quel point la situation est différente en fonction de ces sous-régions, notamment si on compare avec les résultats agrégés pour Afrique. Ces résultats sont issus d'un scénario de référence, Business as Usual, sans contrainte climatique particulière. Dans ce scénario BAU, les vitesses de croissance d'accès à l'électricité étaient également supposées à 1 pour chacune des sous-régions (Figure 11).

<sup>20</sup> Algérie, Egypte, Libye, Maroc, Mauritanie, Tunisie.

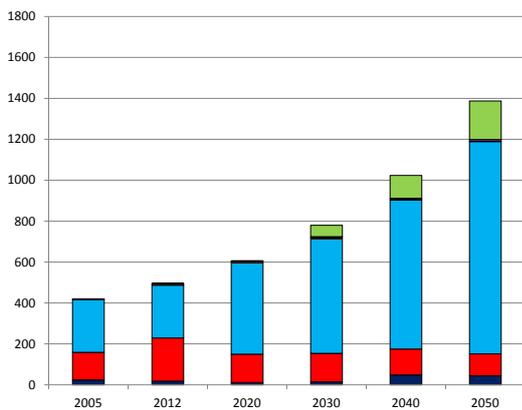
<sup>21</sup> Angola, Bénin, Botswana, Burkina Faso, Burundi, Cameroun, Cap Vert, Congo, Côte d'Ivoire, Djibouti, Ethiopie, Gabon, Gambie, Ghana, Guinée, Guinée Equatoriale, Guinée-Bissau, Kenya, Lesotho, Liberia, Madagascar, Malawi, Mali, Maurice, Mozambique, Niger, Nigeria, Uganda, République Centrafricaine, République Démocratique du Congo, Rwanda, Sao Tome et Principe, Sénégal, Sierra Leone, Somalie, Soudan, Swaziland, Tanzanie, Chad, Togo, Zambie, Zimbabwe.



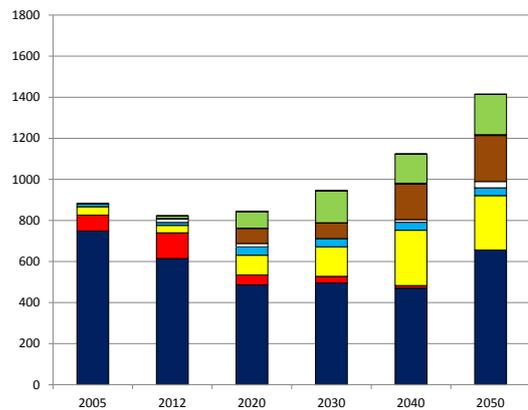
a) Afrique



b) Afrique du Nord



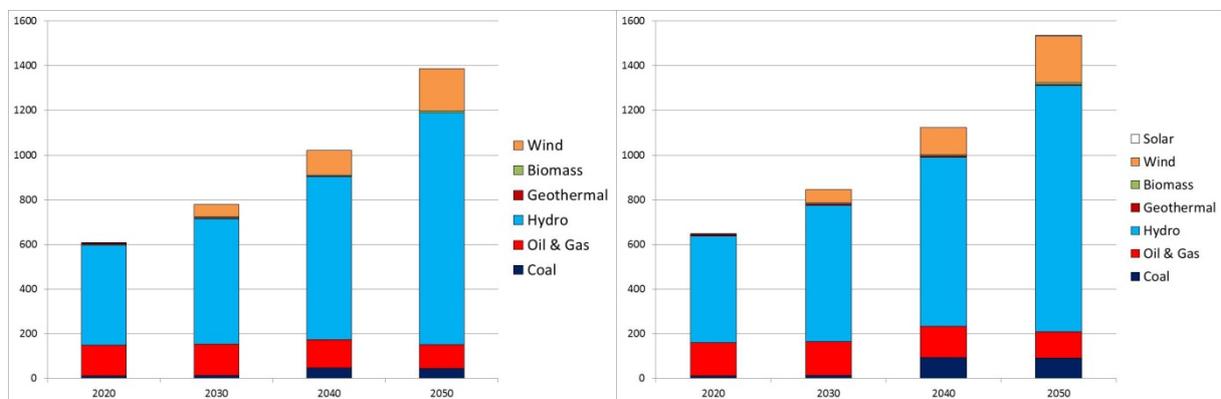
c) Afrique sub-saharienne



d) Afrique du Sud

Figure 11: Mix électrique africain par sous-régions dans un scénario BAU (PJ)

Dans un second temps, dans la figure ci-dessous (Figure 12), est présentée une première modification du mix électrique de l'Afrique sub-saharienne selon une évolution différente de la production d'électricité par habitant, représentant l'accès à l'énergie de la région. Cela nous permet notamment d'étudier l'utilisation du potentiel des ressources énergétiques dans les différentes sous-régions en Afrique et le potentiel de production au sein de l'Afrique. Cela permet notamment de discuter la question des éventuels projets technologiques en ligne avec le développement du secteur de l'énergie en Afrique.



a) Scénario BAU

b) Accès contrasté à l'énergie

Figure 12: Mix électrique africain en Afrique sub-saharienne dans un scénario BAU et dans un scénario de vitesse contrastée d'accès (PJ)

Un autre scénario avec des vitesses contrastées (Figure 13) a alors été implémenté.

2005			Vitesse		2050		
	Prod/habitant (kWh/habitant)	Répartition		Taux de croissance		Prod/habitant (kWh/habitant)	Répartition
Nord	1 231	36 %	→	0,75	→	1 806	36 %
Sub-Sahara	164	21 %	→	1	→	266	35 %
Sud	4 930	43 %	→	0,5	→	6 466	29 %
<b>AFRIQUE</b>	<b>601</b>	<b>100 %</b>				<b>639</b>	<b>100 %</b>

Figure 13: Scénario d'accès contrasté à l'électricité

Partant de ces éléments, nous avons étudié l'impact d'une politique climatique sur le mix électrique africain et ses trois sous-régions. Nous avons conservé les deux scénarios de développement d'accès à l'électricité à l'horizon 2050 qui avaient été envisagés, pour rappel, le premier supposant une vitesse d'accès égale dans les trois sous-régions (on nommera le scénario « Same ») et le second considérant un taux d'évolution de la production électrique par habitant, plus fort en Afrique sub-saharienne que dans les deux autres régions (on nommera le scénario « Contrasted »). Les résultats sur la production électrique en Afrique sont alors comparés entre le scénario de référence Business As Usual (BAU) et le scénario à objectif climatique de réduction des émissions d'un facteur 2 (on nommera le scénario Fact2).

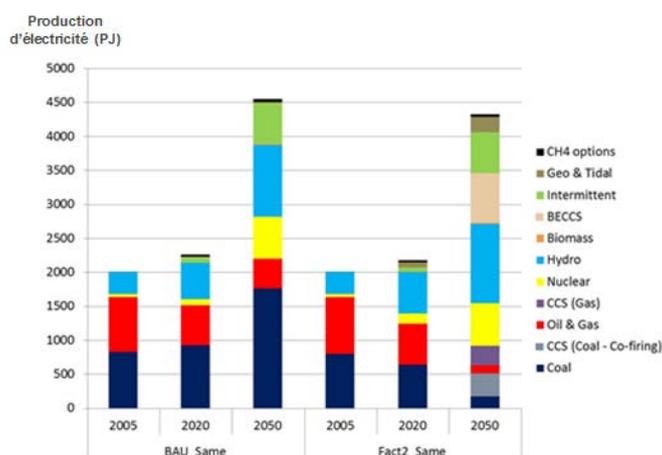


Figure 14 : Production d'électricité (PJ) en Afrique dans le BAU et le scénario climatique

Dans le scénario BAU, à vitesse de croissance égale, le mix reste dominé à terme par le charbon qui est accompagné d'un développement de l'énergie hydraulique, des renouvelables intermittents ainsi que du nucléaire (Figure 14). La réponse à une contrainte climatique se traduit alors par un développement accru de la filière hydraulique, l'intégration de technologies de capture et séquestration du carbone (CSC) sur les centrales à gaz et charbon ainsi que le déploiement de centrales biomasse. L'analyse des trois sous régions permet, quant à elle, de constater qu'en Afrique du Nord (Figure 15), le scénario de référence se traduit par l'augmentation de la part du charbon et des hydrocarbures. En revanche, le scénario climatique va favoriser le développement des technologies de séquestration de carbone couplées aux centrales biomasse et gaz. Notons que les vitesses d'accès à l'énergie différenciées considérées dans ces deux scénarios n'ont pas d'impacts significatifs pour l'Afrique du Nord.

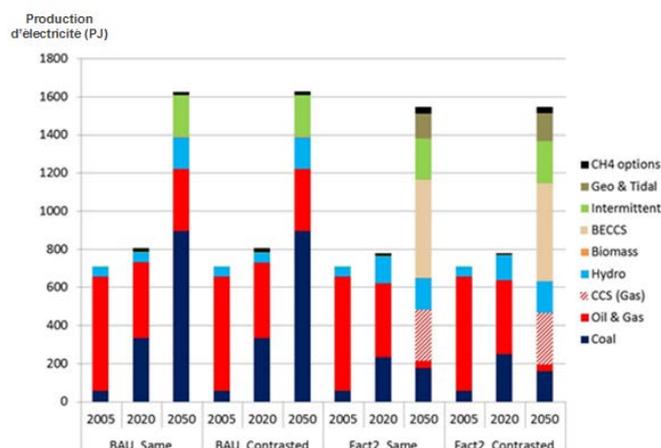


Figure 15 : Production d'électricité (PJ) en Afrique du Nord dans le BAU et le scénario climatique, suivant des contraintes d'accès à l'électricité

En Afrique sub-saharienne, une vitesse d'accès à l'électricité supérieure à celle des autres régions dans le scénario « Contrasted » se traduit notamment par une plus forte hausse de la demande énergétique par rapport aux scénarios « Same » (Figure 16). Quel que soit le scénario, un important développement de l'hydroélectricité est observé. Celui-ci est également couplé à l'apparition de CSC et des filières renouvelables ainsi qu'à un développement du nucléaire si la contrainte climatique est introduite.

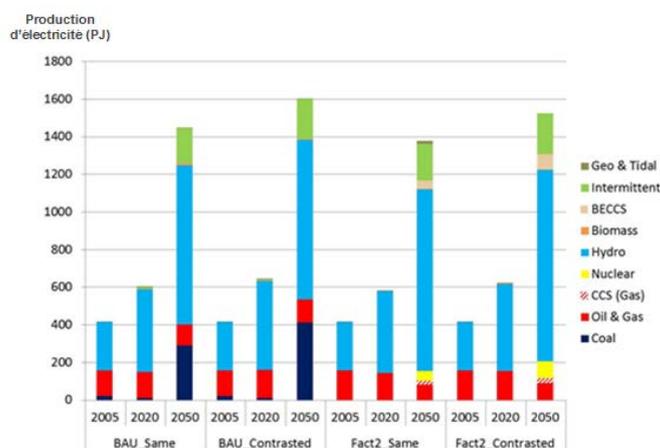


Figure 16 : Production d'électricité (PJ) en Afrique sub-saharienne dans le BAU et le scénario climatique, suivant des contraintes d'accès à l'électricité

L'Afrique du Sud, pour qui la vitesse d'évolution de l'accès à l'électricité est plus faible que dans les deux autres régions dans le scénario « Contrasted » par rapport au scénario « Same » pourrait, quant à elle, s'appuyer essentiellement sur le charbon et le nucléaire pour son mix électrique. (Figure 17) La réponse à une contrainte environnementale se traduit également par un développement de la CSC couplé aux centrales à charbon et à biomasse.

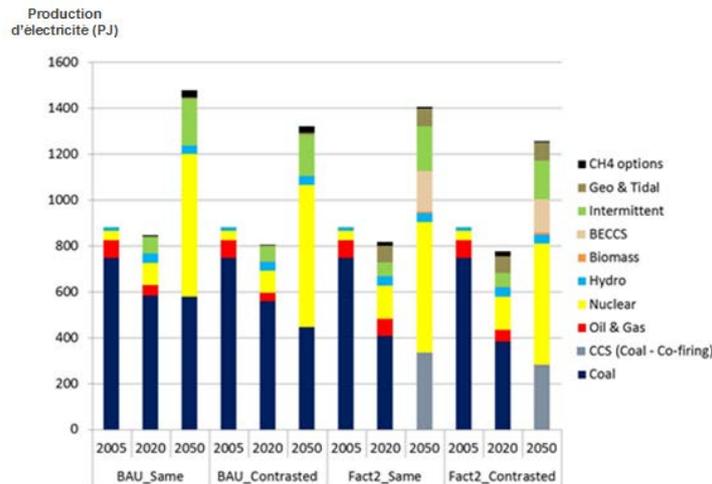


Figure 17 : Production d'électricité (PJ) en Afrique du Sud dans le BAU et le scénario climatique, suivant des contraintes d'accès à l'électricité

Au vu de ces résultats, il est intéressant de s'interroger sur le niveau de contribution qui pourrait être apporté par les pays en voie de développement dans le but d'atteindre une cible ambitieuse de réduction des émissions de GES. En 2008, la discussion autour d'une réduction de 15 à 30 % en 2020 par rapport à un scénario BAU avait déjà fait place à un grand débat dans la communauté des pays en voie de développement, ces derniers jugeant cet objectif trop contraignant et non justifié au regard de la responsabilité historique des pays industrialisés. Dans la présente analyse, le scénario climatique représente une réduction des GES encore plus conséquente, atteignant près de 41 % en 2020 par rapport au BAU, les pays en développement étant les régions où l'action de réduction apparaît la moins coûteuse par rapport aux pays industrialisés. Mais reste à déterminer comment financer la mise en œuvre d'investissement dans un système électrique décarboné au vu de telles cibles de réduction. Ce qui conduit de fait également à divers questionnements sur les choix technologiques et d'investissement :

- Le potentiel des renouvelables : le solaire va-t-il pouvoir se développer sans soutien financier ?
- Comment concilier la compétition entre les usages alimentaire et énergétique de la biomasse ? Comment assurer une exploitation renouvelable de celle-ci ? Comment empêcher une aggravation de la déforestation ?
- Comment peut-on résoudre le problème prioritaire des pertes électriques de distribution ? Peut-on introduire des solutions intelligentes pour gérer l'équilibre de l'offre et de la demande ?

En outre, ces résultats nécessitent d'être mis en perspectives avec d'autres facteurs de rationalité économique tels que les coûts de production d'électricité ou la priorité au développement économique, l'accès à l'énergie nécessitant un besoin massif et accéléré d'électrification.

Les travaux sur le système électrique africain ont été présentés à plusieurs reprises lors de conférences nationales et internationales : en 2014, lors d'une table ronde sur la prospective énergétique organisée par l'Association DynamOSE à Paris ; en 2013, lors de la Conférence des Nations Unies sur les Changements Climatiques (COP 19) à Varsovie en Pologne, dans le pavillon européen ; en 2012, lors du Workshop International de l'ETSAP à Cape Town en Afrique du Sud ; en 2012, lors du Workshop International ETSAP-TIAM, à Lisbonne au Portugal et en 2012, lors de la Journée de la Chaire MPDD sur la Prospective des enjeux énergie-climat.

## E. L'approche combinée Bottom-up/Top down

Un autre chantier visant au développement des outils de modélisation prospective concerne la mise en dialogue des modèles d'optimisation bottom-up, comme ceux de la famille TIMES, et les modèles macroéconomiques top-down, les deux types dominants de modèles Energie-Economie. J'ai travaillé à un tel rapprochement dans le cadre de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable, en collaboration avec le CIRED<sup>22</sup>, co-fondateur de cette dernière avec le CMA. En effet, les analyses prospectives économiques, technico-économiques et environnementales mondiales récentes reposent en partie sur les efforts importants réalisés par la communauté scientifique au cours des dernières décennies pour améliorer la connaissance des interactions entre la croissance économique et l'environnement. Notamment, les méthodes de modélisation ont été approfondies pour devenir de plus en plus appliquées à l'évaluation des conséquences environnementales et économiques des différentes politiques énergétiques et climatiques. Cependant, les points de vue divergents des modèles développés par les ingénieurs de l'énergie, les modèles bottom-up, et ceux développés par les économistes, les modèles top-down, entravent le dialogue efficace et la compréhension mutuelle entre les chercheurs émanant et évoluant dans différents milieux scientifiques ou universitaires. Le but de ce travail, et l'objectif de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable, est alors de promouvoir un dialogue constructif entre les modélisateurs de chaque côté des paradigmes de modélisation, basé sur une critique comparative du modèle TIAM-FR et le modèle IMACLIM-R, représentant respectivement l'approche bottom-up et top-down. L'intérêt d'un couplage pour TIAM-FR réside également notamment en l'endogénéisation des déterminants économiques et sociodémographiques de la demande de services énergétiques, qui sont actuellement renseignés par le modélisateur. Un couplage avec un modèle macroéconomique permettrait de tenir compte implicitement des autres secteurs économiques sans se limiter au système énergétique, comme c'est le cas de TIAM-FR. L'objectif est alors d'approfondir les connaissances sur les interactions entre la croissance économique, l'énergie et l'environnement, en tenant compte par exemple de la question de l'emploi, et permettrait une évaluation plus fine des conséquences environnementales et économiques de l'évolution des différents besoins en énergie et des politiques de GES. Une première investigation a ainsi été réalisée avec les modèles TIAM-FR et IMACLIM-R (version récursive du modèle d'équilibre général calculable développé au CIRED) avec pour objectif de confronter les caractéristiques et spécifications de ces deux modèles et de discuter la pertinence et les difficultés d'un éventuel couplage. Cette recherche a été réalisée de concert par Nadia MAÏZI, Edi ASSOUMOU et moi-même pour l'équipe du CMA et par Jean-Charles HOURCADE, Jun LI et Frédéric GHERSI pour l'équipe du CIRED. La présentation qui suit résulte du travail qui a été mené ensemble.

Dans un premier temps, afin d'établir les conditions d'un dialogue constructif entre les deux modèles, un effort systématique d'éclaircissement des sources d'incompréhension a été déployé pour chaque modèle, à un niveau très technique. Il s'agissait d'éclairer les fondements théoriques des deux modèles mais aussi leur structure, leurs caractéristiques, les niveaux d'applications pour l'évaluation des politiques. La table ci-dessous synthétise et confronte les principales spécifications des deux modèles.

---

<sup>22</sup> Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CNRS, Ecole des Ponts ParisTech, AgroParisTech, CIRAD, EHESS)

Table 7 : Principales spécifications des modèles TIAM-FR et IMACLIM-R

TIAM-FR - Modèle bottom-up	IMACLIM-R - Modèle top-down
<b>Principales caractéristiques</b>	
Secteur énergétique	Interaction entre le secteur énergétique et le reste de l'économie
Riche description détaillée de technologies (présentes/futures - offre/usage final)	Description agrégée du système
Evolution du système énergétique : résultats issus d'une multitude de décisions d'adoption de technologies et d'investissements	Modélise l'offre et la demande des Biens et Services : données de la comptabilité nationale en données monétaires : consommation, prix, revenus, coûts des facteurs
Modèle d'optimisation : minimise le coût total actualisé du système pour satisfaire les demandes de services énergétiques sous une série de contraintes prédéterminées	Modèle d'équilibre général calculable
Equilibre partiel : ne considère pas les feedbacks des marchés non-énergétiques, le prix des facteurs de production primaire et les effets d'équilibre général (revenu, épargne)	Simulation des marchés pour les facteurs primaires de production, les biens et services domestiques et importés qui sont équilibrés par des ajustements de prix
Ex: pas d'impact des investissements sur le coût du capital (ni sur les prix du pétrole)	Ils réduisent les technologies à des échanges entre les facteurs de production agrégés ou des biens de consommation
	Ex: les coûts du capital sont traités par défaut comme le reste de la valeur ajoutée, une fois les coûts du travail et les rentes des ressources naturelles soustraites
<b>Principaux inputs</b>	
Evolution de la population	Evolution de la population
Croissance du PIB	Evolution de la population active
Croissance des secteurs	Productivité du travail
Coûts de l'approvisionnement en énergie et des technologies d'usage final	Taux d'épargne
Coûts d'extraction des ressources primaires	Elasticités de substitution de la consommation des ménages
Réserves ou potentiel des ressources primaires	Elasticités de substitution du commerce international
	Ressources primaires
<b>Principaux outputs</b>	
Séries d'investissements dans toutes les technologies	PIB
Niveaux de production de chaque technologie	Emploi
Quantités importées et exportées de chaque type d'énergie commercialisable	Production (12 secteurs)
Niveaux d'extraction de chaque forme d'énergie primaire	Demandes finales et intermédiaires (12 biens) incluant la demande d'énergie finale
Flux entrée/sortie de chaque commodité de chacune des technologies	Les salaires réels
Emissions de CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> et N <sub>2</sub> O de chaque technologie, secteur, et globales	Emissions de CO <sub>2</sub>
Evolution de la concentration atmosphérique de GES, le forçage radiatif induit et le changement dans la température globale lui-même induit par ce dernier	Investissements dans les secteurs de l'énergie
	Emissions de GES

Les principaux résultats du TIAM-FR sont les investissements et les niveaux d'activités des technologies à chaque période de temps et pour chaque région à venir. Il en résulte la structure du système énergétique qui est donnée comme un output de l'optimisation, comme présenté précédemment. Par comparaison, les sorties IMACLIM-R couvrent une série de variables

macroéconomiques telles que le PIB, les salaires réels, l'emploi, les prix en plus de l'investissement dans les secteurs de l'énergie, l'approvisionnement en énergie et les émissions de carbone (Table 7).

Ensuite, des expérimentations préliminaires (Figure 18) ont été développées afin de démontrer la pertinence de relier les deux modèles, en même temps que les défis techniques et les limites méthodologiques d'un tel couplage ont été étudiés.

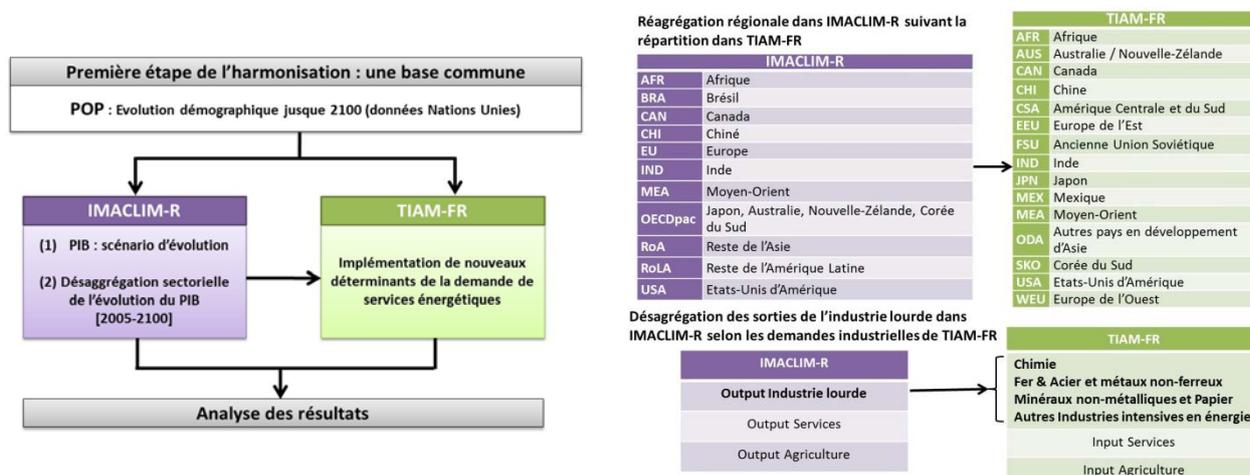


Figure 18 : Première expérimentation d'échanges de données entre les modèles TIAM-FR et IMACLIM-R

La première étape du dialogue a été de partir sur une base relativement commune : les déterminants des demandes de services énergétiques. Nous avons ainsi implémenté les mêmes données d'évolution démographique jusque 2100 en nous basant sur les scénarios des Nations Unies. Ensuite, après une première exécution du modèle IMACLIM-R, les principaux indicateurs économiques (évolution des niveaux d'activité sectoriels, taux de croissance du PIB, etc.), ont été renseignés dans le modèle TIAM-FR comme déterminants de la demande d'énergie. Concernant les activités sectorielles, les taux de croissance des productions dans l'industrie lourde décomposée en quatre sous-secteurs (produits chimiques ; acier, fer et métaux non ferreux ; minéraux non métalliques et papier ; autres industries intensives en énergie). Les évolutions des productions agricoles et du secteur des services ont été considérées. Cela a de prime abord nécessité une restructuration de la répartition régionale d'IMACLIM-R, afin de correspondre avec celle de TIAM-FR. Une désagrégation de la production de l'industrie lourde dans IMACLIM-R a également été réalisée pour correspondre avec les secteurs de la demande industrielle de TIAM-FR.

Comme ces deux modèles existaient avant l'exercice, il est difficile de modifier leur structure et leur méthode de résolution. Pour autant, cela doit être pensé pour pouvoir aller plus loin, impliquant ainsi la résolution de certains problèmes techniques et la création d'un processus d'itérations permettant de réviser les entrées attendues de TIAM-FR (par exemple tous les 5 ans) et les entrées en feedback dans IMACLIM-R permettant de recalculer les nouveaux prix d'équilibre chaque année. Ceci n'a pas été réalisé dans le cadre de ces travaux. Pour autant, pour pouvoir traiter ce premier exercice, notre analyse s'est concentrée sur les perspectives de croissance économique, les demandes d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub>. L'horizon temporel de la modélisation est 2100. La comparaison des résultats issus de TIAM-FR et d'IMACLIM-R mettra en évidence des résultats à l'échelle mondiale.

Plus précisément, le modèle IMACLIM-R a tout d'abord simulé deux scénarios contrastés : un scénario de référence, business as usual (BAU) et un scénario de politique climatique, à savoir une limitation de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> à 450 ppm en 2100 correspondant à une politique climatique mondiale visant à atteindre un objectif de 2°C. Cela nous a permis d'obtenir une variété d'indicateurs macroéconomiques qui ont ensuite été intégrés dans TIAM-FR tel que précisé plus haut. Les indicateurs d'IMACLIM-R correspondant à une situation BAU ont été implémentés dans TIAM-FR pour optimiser le système énergétique en situation de BAU et les indicateurs d'IMACLIM-R correspondant à une situation de contrainte climatique ont été implémentés dans TIAM-FR pour optimiser le système énergétique dans le cas d'une même contrainte climatique, à savoir une concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> limitée à 450 ppm en 2100. J'ai également exécuté ce scénario de contrainte climatique en considérant les indicateurs macroéconomiques d'IMACLIM-R en contexte de BAU. La table suivante synthétise ces deux scénarios, BAU et CLIM et les trois configurations étudiées.

Table 8 : Scénario analysés

		Indicateurs macroéconomiques provenant de	
		Scénario BAU dans IMACLIM-R	Scénario climatique dans IMACLIM-R
Scénarios exécutés dans TIAM-FR	BAU	X	
	CLIM_dCLIM		X
	CLIM_dBAU	X	

Ainsi, dans les scénarios BAU et CLIM\_dBAU, les demandes de services énergétiques que TIAM-FR doit satisfaire dans son programme d'optimisation sont les mêmes, car dépendantes des mêmes déterminants. Ces demandes sont par contre différentes dans le scénario CLIM\_dCLIM, car dépendantes de déterminants macroéconomiques différents. On notera que les prix dans les deux modèles n'étant pas harmonisés, nous n'avons pas considéré de demandes élastiques. Le graphique suivant met en évidence des variations de demandes dans le cas, par exemple, ici pour le secteur résidentiel (Figure 19).

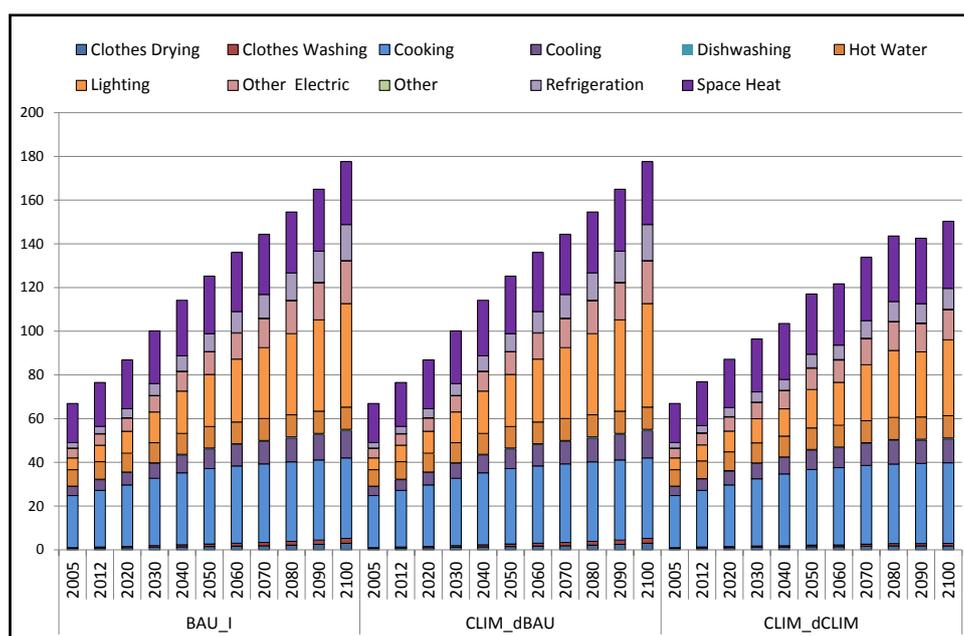


Figure 19 : Demandes de services énergétiques dans le secteur résidentiel (EJ)

Il en résulte que dans le scénario CLIM\_dBAU, les demandes de services énergétique correspondant à celles implémentées dans le BAU, la contrainte climatique visant à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> suivant la cible des 450 ppm repose entièrement sur le côté offre et résulte totalement des investissements dans les technologies représentées dans le modèle. Dans le scénario CLIM\_dCLIM, les niveaux de demandes de services énergétiques sont inférieurs, reflétant les effets de rétroactions des prix induits par la politique climatique.

Si on s'intéresse aux trajectoires d'émissions de CO<sub>2</sub> induites par les contraintes climatiques (Graphique X), force est de constater qu'en 2100, ces dernières devraient être divisées par plus de 3 dans le monde pour se conformer à la contrainte de 450 ppm. Dans le scénario BAU, les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> devraient doubler en 2050 par rapport à 2005 et atteindre plus de 61 Gt en 2100. Dans les scénarios CLIM\_dBAU et CLIM\_dCLIM, l'objectif de 450 ppm permet de réduire drastiquement les émissions de CO<sub>2</sub> sur la période jusqu'à un niveau de 19 Gt en 2100. Mais il est intéressant de noter que, pour ces derniers scénarios, les trajectoires d'émissions sont différentes en raison des niveaux différents de demandes. En effet, alors que les émissions de CO<sub>2</sub> poursuivent une croissance jusqu'en 2040 dans CLIM\_dBAU pour ensuite progressivement ralentir jusqu'à 2100, les émissions de CO<sub>2</sub> dans CLIM\_dCLIM cessent de croître dès 2012 (en dehors d'une croissance en 2050, qui s'explique par les niveaux de demande résultant des déterminants implémentés).

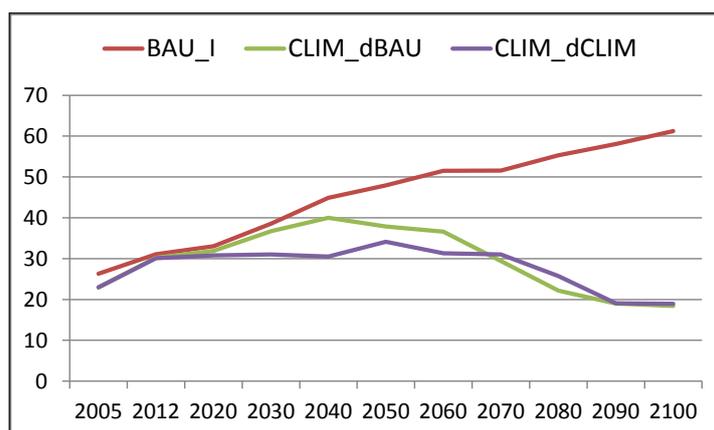


Figure 20: Emissions mondiales de CO<sub>2</sub> (Gt)

La comparaison des trajectoires exprimées dans CLIM\_dBAU et CLIM\_dCLIM illustre à nouveau la divergence entre TIAM-FR et IMACLIM-R en termes d'approche de modélisation. Sous une trajectoire de réduction intertemporelle optimisée (CLIM-dBAU), les émissions peuvent continuer de croître jusqu'en 2040, puis légèrement baisser jusqu'en 2060 avant de diminuer fortement. En revanche, comme un agent ne peut pas voir cette trajectoire optimale dans IMACLIM-R, le signal prix doit alors être très fort (pour refléter le degré de la contrainte à 450ppm) pour limiter la demande de biens et services dépendants des combustibles fossiles. Cependant, à long terme, les émissions auraient plus de flexibilité pour croître dans CLIM-dCLIM que dans CLIM\_dBAU car l'économie aurait alors été largement décarbonée. Nous pouvons de prime abord conclure que TIAM-FR et IMACLIM-R proposeraient différents arbitrages et différentes programmations temporelles de réductions des émissions pour une cible climatique donnée.

D'autre part, même si dans les deux scénarios climatiques, les principaux secteurs qui devraient être décarbonés dans le but d'atteindre l'objectif d'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> sont le secteur

électrique, suivi de celui de l'industrie, on note que la distribution des émissions de CO<sub>2</sub> par secteur varie quelque peu suivant que l'on considère CLIM\_dBAU ou CLIM\_dCLIM (Figure 21).

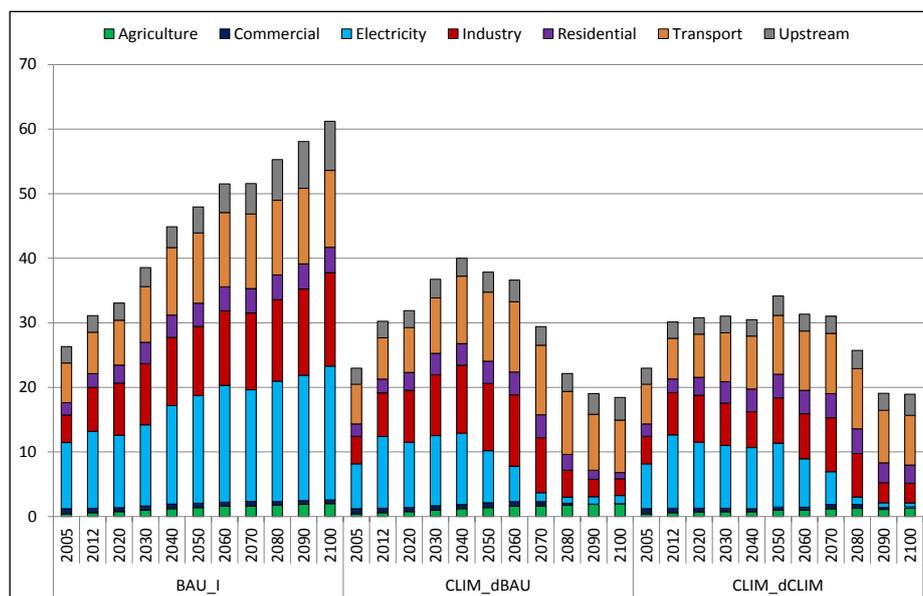


Figure 21: Emissions mondiales de CO<sub>2</sub> par secteur (Gt)

Plus précisément, dans CLIM\_dBAU, le CO<sub>2</sub> émis par le secteur de l'électricité diminue passant d'environ 7 Gt en 2005 à 1,2 Gt en 2100. Les émissions de CO<sub>2</sub> dans le scénario CLIM\_dCLIM atteignent quant à elles 0,6 Gt en 2100. Elles représentent près de 21 Gt en 2100 dans le BAU. La part du secteur de l'électricité dans le total des émissions de CO<sub>2</sub> passe de 30 % en 2005 à 7 % dans CLIM\_dBAU et à 3 % dans CLIM\_dCLIM. Bien que ce dernier scénario semble plus strict en termes de décarbonisation pour le secteur de l'électricité, il est intéressant de noter que les mesures d'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'industrie sont plus importantes dans CLIM\_dBAU que dans CLIM\_dCLIM. En effet, les émissions atteignent 2,6 Gt en 2100 dans le premier contre 3 Gt de CO<sub>2</sub> dans le second scénario (14,5 Gt de CO<sub>2</sub> émis dans le BAU en 2100). Les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'industrie représentent alors en 2100 14% dans CLIM\_dBAU et 16% dans CLIM\_dCLIM des émissions totales (24 % dans le BAU) contre 19 % en 2005.

Les autres secteurs touchés par la contrainte climatique sont les secteurs tertiaire et résidentiel. Dans le BAU, ils représentent respectivement 1 % et 6 % des émissions de CO<sub>2</sub> en 2100 (contre 3 % et 7 % en 2005). Dans CLIM\_dBAU, ils représentent respectivement près de zéro et 5 % en 2100 et respectivement 1 % et 16 % dans CLIM\_dCLIM à la même période. Les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur tertiaire passent en effet de 0,8 Gt en 2005 à 0,007 Gt en 2100 (et à 0,1 Gt dans CLIM\_dCLIM contre 0,5 Gt dans le BAU) en 2100. On notera que dans le BAU, les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur tertiaire sont moins élevées en 2100 qu'en 2005. Concernant les émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur résidentiel, elles passent de 1,9 Gt en 2005 à 0,9 Gt en 2100 dans le scénario CLIM\_dBAU et à 2,8 Gt dans le scénario CLIM\_dCLIM, contre 3,9 Gt dans le BAU. Ces résultats suggèrent que le secteur des transports apparaît comme le plus difficile à décarboniser. En effet, l'impact sur le secteur des transports est moins important et la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans les scénarios climatiques est assez limitée si on compare avec la situation dans le BAU. Par contre, la décarbonisation des autres secteurs implique que les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur des transports représenteraient alors plus de 40 % en 2100 dans les scénarios climatiques par rapport à 19 % dans le BAU.

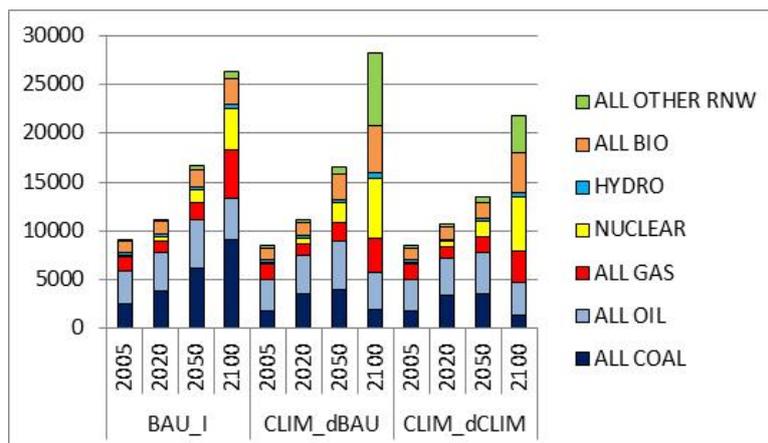


Figure 22 : Consommation mondiale d'énergie primaire (mtep)

En ce qui concerne la consommation mondiale d'énergie primaire, elle augmente dans le scénario BAU de 1,1 % par an entre 2005 et 2100 pour atteindre un niveau 2,9 fois plus élevé à la fin de la période (Figure 22). La consommation mondiale est plus élevée dans le scénario CLIM\_dBAU en 2100 en raison de la substitution technologique pour se conformer aux contraintes d'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub>. A l'inverse, il est intéressant de noter l'effet du plus faible niveau de la demande finale dans le scénario de CLIM\_dCLIM où la consommation mondiale d'énergie primaire représente environ 82 % de celle exprimée dans le BAU et 77 % de celle du scénario CLIM\_dBAU. Dans tous les trois cas de figure, le mix énergétique primaire est encore dominé par les combustibles fossiles jusqu'en 2050. En 2100, la contrainte pèse plus lourdement et les énergies renouvelables sont davantage développées, tout comme le nucléaire. La part des énergies renouvelables (hors hydraulique), de l'énergie nucléaire et de la biomasse représente respectivement 26 %, 22 % et 17 % de la demande d'énergie primaire en 2100 dans CLIM\_dBAU et 17 %, 26 % et 19 % dans CLIM\_dCLIM. Les scénarios climatiques ont un impact réel sur le mix énergétique primaire. La demande pour la biomasse et les énergies renouvelables augmente de manière significative si on compare avec le BAU alors que la demande pour le charbon et le pétrole diminue fortement. Les combustibles fossiles représentent 33 % de la consommation primaire dans CLIM\_dBAU et 36 % dans CLIM\_dCLIM. Dans le BAU, le charbon, le pétrole et le gaz représentent 69 % du mix primaire.

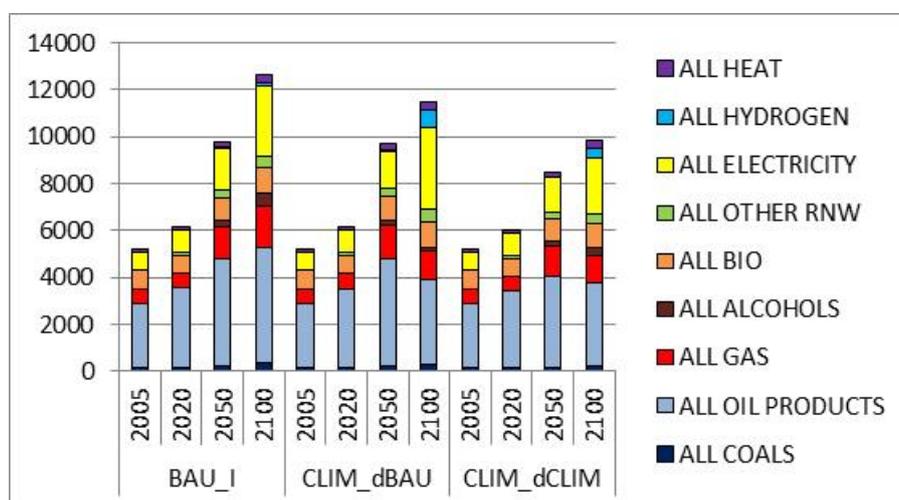


Figure 23 : Consommation mondiale d'énergie finale (mtep)

La consommation mondiale d'énergie finale quant à elle augmente de 0,9 % par an entre 2005 et 2100 dans le BAU pour atteindre un niveau 2,4 fois plus élevé à la fin de la période. Les combustibles fossiles représentent 67 % du mix final en 2005 et 56 % en 2100. Les énergies renouvelables augmentent fortement dans la période, mais leur part évolue nettement moins en ce sens où elles représentent 16 % de la consommation finale d'énergie en 2005 et 17 % en 2100 (Figure 23). La consommation d'électricité augmente de 296 % entre 2005 et 2100. Cette croissance est plus élevée dans CLIM\_dBAU, avec une augmentation de 367 % sur la même période, mais inférieure dans CLIM\_dCLIM, avec 223 %, reflétant là encore l'effet induit par le paramétrage de la demande. En 2100, l'électricité compte pour 30% dans CLIM\_dBAU et 25% dans CLIM\_dCLIM, contre 23 % dans le BAU. Aucun grand changement structurel n'est à noter en ce qui concerne l'énergie finale entre les résultats du BAU et ceux des scénarios climatiques au cours de la période. Les modifications se produisent plutôt dans le mix électrique.

Le secteur électrique a été l'un des secteurs les plus contributifs à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. La mise en œuvre des politiques climatiques a créé un déploiement massif de sources faiblement émettrices de carbone (nucléaire, hydraulique, renouvelable et biomasse), leur contribution à la production d'électricité représente ainsi 75 % dans CLIM\_dBAU et 83 % dans CLIM\_dCLIM en 2100, par rapport à 47 % dans le scénario BAU. Dès 2050 dans les scénarios climatiques, leur part dans la production d'électricité devient supérieure à celle des sources fossiles. La part du charbon et du gaz diminue ainsi considérablement avec la mise en œuvre d'une contrainte climatique mais elle est alors intégrée dans le déploiement des technologies de capture du carbone qui sont fortement développées en 2100, représentant 25 % du mix électrique dans CLIM\_dBAU et 17 % dans CLIM\_dCLIM. La figure 24 décrit également un fort développement des énergies renouvelables, en particulier dans le scénario CLIM\_dBAU où elles représentent 31% de la production d'électricité en 2100. Leur déploiement est moins important dans le scénario CLIM\_dCLIM tandis que la production d'électricité nucléaire est similaire dans les deux scénarios climatiques. Il en résulte une part du nucléaire atteignant 47% dans CLIM\_dCLIM par rapport à 35% dans CLIM\_dBAU.

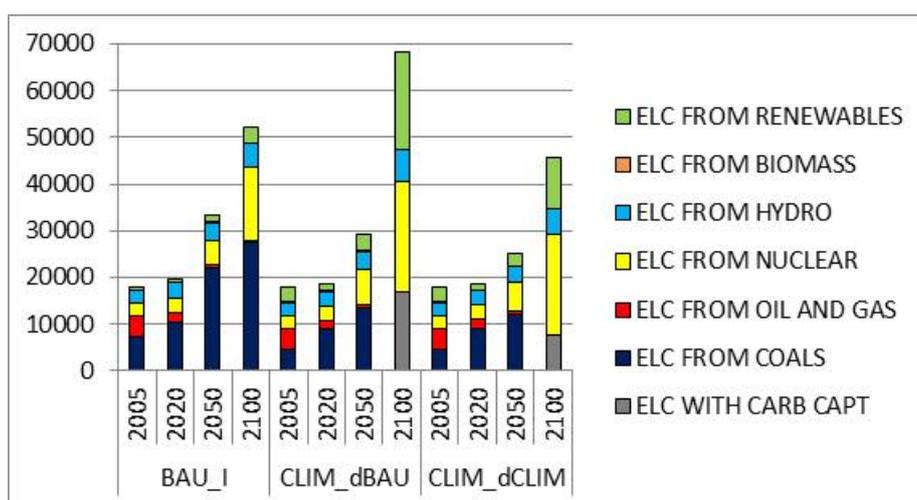


Figure 24 : Production mondiale d'électricité (TWh)

Après un décryptage détaillé des spécifications des deux modèles, ces analyses ont servi à alimenter la discussion sur la question d'une harmonisation entre TIAM-FR et IMACLIM-R visant à atteindre un

éventuel couplage. De nombreux échanges ont eu lieu entre les chercheurs du CMA et du CIRED impliqués dans cette problématique de recherche et des conclusions préliminaires ont pu être exprimées.

Il ressort tout d'abord que les cadres conceptuels des deux modèles doivent, en quelque sorte, être conciliés. Cela est particulièrement difficile dans le cas de TIAM-FR et d'IMACLIM-R, compte tenu de la manière dont chacun des deux modèles gère la dynamique du temps, suivant une approche d'optimisation pour le premier et selon une approche récursive pour le second. En substance, les résultats d'optimisation de TIAM-FR sont « normatifs » au sens où ils décrivent les investissements et les trajectoires de consommation permettant de minimiser les coûts en situation d'information parfaite. A l'inverse, les résultats d'IMACLIM-R sont des trajectoires économiques « positives » découlant de la nature fragmentée de la prise de décision et de l'hypothèse d'anticipations myopes ou imparfaites. Le pont entre ces deux approches apparemment inconciliables peut être quelque peu établi en introduisant un ensemble de contraintes dans TIAM-FR qui pourraient imiter certaines des caractéristiques sous-optimales des économies réelles temporairement modélisées par IMACLIM-R. En règle générale, le commerce sur les marchés internationaux stratégiques comme celui du pétrole brut peut être contraint de manière exogène, tout comme les rentes pétrolières peuvent être représentées par des coûts de transaction accrus. Une autre manière possible de concilier les deux approches est de simplement accepter qu'une partie du système économique, la partie relative à la fourniture d'énergie et d'utilisation finale des équipements d'énergie, pourrait être gouvernée d'une manière beaucoup plus centralisée et rationnelle que le reste de l'activité économique. En dépit de la nature décentralisée des décisions de demande d'énergie, ce cas pourrait être réalisé en tenant compte de l'ampleur de l'intervention politique en matière d'énergie, à la fois du côté de l'offre et de la demande sur les marchés. La divergence fondamentale demeure, néanmoins, TIAM-FR fonctionne en information parfaite, nonobstant toute contrainte supplémentaire visant à contrôler ses trajectoires.

Le deuxième axe de recherche qui doit être étudié au regard d'expériences de couplage concerne les champs d'application de la modélisation. Au-delà du fait évident qu'un modèle bottom-up est limité aux questions énergétiques alors qu'un modèle top-down s'étend à toutes les activités économiques, la portée précise de deux types de modèles doit être analysée en profondeur. Du point de vue top-down, le traitement des productions énergétiques décentralisées est problématique. IMACLIM-R ne traite pas la biomasse traditionnelle par exemple, tout comme le modèle n'est pas approprié pour décrire la production d'électricité décentralisée, dans la mesure où les consommations d'énergie découlant de ces technologies ne sont pas entreprises par des opérations de marché, autrement dit, elles échappent aux conventions comptables nationales actuelles sur lesquelles les modèles top-down fondent leur description des économies. D'un point de vue global, la production d'électricité décentralisée peut être modélisée comme une substitution du capital à la consommation d'énergie - mais cela est vrai aussi de toute amélioration de l'efficacité énergétique dans les équipements d'usage final, et les deux effets devraient probablement être découplés. Du côté de TIAM-FR, la question est celle de la disponibilité d'information économique au-delà des marchés de l'énergie. Sa représentation explicite des équipements d'usage final, et de la plupart des constructions et modernisation de bâtiments tout comme les voitures personnelles, implique que TIAM-FR parvient, au-delà de la demande d'énergie, à représenter la demande pour différents secteurs d'équipement.

Le troisième axe d'investigation d'une expérience de couplage est une comparaison des nomenclatures. Les champs d'applications partagés par les deux types de modèles peuvent en effet être organisés de manières assez différentes, suivant la façon dont les logiques de comptabilité nationale sur lesquelles reposent les modèles top-down diffèrent de la logique du bilan énergétique des modèles bottom-up. Du côté de l'offre des marchés énergétiques, les multiples structures de coûts de la production d'électricité représentée dans TIAM-FR sont synthétisées dans un secteur agrégé par IMACLIM-R. A moins d'une désagrégation coûteuse, pour toute expérimentation de couplage, l'intensité capitalistique de ce secteur unique devra refléter les différents impacts de la pénétration des énergies renouvelables et l'avenir de l'électricité nucléaire (émanant de choix politiques), alors qu'il devra aussi traduire les développements anticipés d'infrastructures - les coûts d'investissement du déploiement des réseaux intelligents. De la même manière, ses intensités touchant au gaz et aux produits pétroliers raffinés devront traduire l'évolution de l'électricité produite à partir de combustibles fossiles, tandis que son intensité dans les produits agricoles sera invitée à tenir compte de toute pénétration de la biomasse. Et du côté de la demande des marchés de l'énergie, les grandes catégories d'usages finaux des bilans énergétiques de TIAM-FR, en particulier ceux touchant au transport et aux bâtiments résidentiels et tertiaires, sont dispersées à travers tous les agents économiques de IMACLIM-R (les divers secteurs de production et l'ensemble des ménages). Dans certains cas, la désagrégation de TIAM-FR permet une connexion plus précise aux secteurs d'IMACLIM-R : les consommations de carburant du transport aérien peuvent sans risque être attribuées au secteur du transport aérien d'IMACLIM-R. De même, les consommations d'énergie du transport par bus et du transport ferroviaire peuvent être attribuées au secteur des transports terrestres d'IMACLIM-R. Par contre, les consommations de carburant des camions et des voitures personnelles sont beaucoup plus difficiles à répartir, d'abord entre les ménages et les secteurs, puis entre les secteurs. Considérer la relation dans l'autre sens, à savoir d'IMACLIM-R vers TIAM-FR, soulève encore d'autres problèmes, comme les secteurs du transport d'IMACLIM-R avec des utilisations de transport et de non-transport agrégés.

Ainsi, cette tentative de couplage montre que les modélisateurs peuvent bénéficier de l'information sur l'économie dans son ensemble avec la représentation des marchés de facteur (capital, travail) représentés dans un modèle macroéconomique d'une part, et combinés avec la richesse en technologies des modèles bottom-up qui représentent mieux les technologies disponibles dans une économie spécifique bornée pour une période de temps donnée, d'autre part. Cependant, les modèles ne convergent pas nécessairement en raison de différences de conception structurelle et de paradigme de modélisation. Certains défis techniques et mathématiques doivent être adressés afin de fournir des indications sur les recommandations politiques. La méthodologie qui a été appliquée présente des limitations en termes d'harmonisation d'indicateurs et de cohérence des prix. De plus, les résultats devraient être interprétés avec précaution. Du point de vue microéconomique, une différence majeure réside entre les modèles top-down et bottom-up, à savoir que les comportements à la fois des fournisseurs d'énergie et des utilisateurs finaux peuvent affecter sensiblement l'équilibre général et les prix sous-jacents sur les différents marchés, ce qui à son tour aura des répercussions sur l'investissement et les décisions d'épargne à travers les régions.

Ces travaux ont été présentés lors d'un workshop international sur les « Methodologies linking energy systems models and economic models » en 2014 à l'University College Cork, en Irlande et à l'issue duquel deux chapitres d'ouvrages ont été publiés à partir de ces travaux<sup>23</sup>.

## II. INVESTIGATIONS DE RECHERCHE

Mes champs d'investigation portent principalement sur la question des impacts régionaux des enjeux climatiques mondiaux. A l'aide du modèle TIAM-FR, présenté précédemment, je développe différents scénarios de politiques climatiques et en analyse les répercussions sur les systèmes énergétiques des régions qui sont caractérisées dans le modèle. Il s'agit plus précisément de discuter la manière dont les systèmes énergétiques peuvent évoluer sur l'horizon temporel étudié pour répondre à ces différentes contraintes climatiques mais aussi technologiques. Ces politiques de contraintes environnementales expriment notamment les engagements de différents pays ou régions auprès des Nations Unies dans le cadre de la Convention Cadre sur les Changements Climatiques et plus précisément de la Conférence des Parties (COP). Je me suis alors plus particulièrement intéressée aux engagements pris à l'issue de la COP 15 qui a eu lieu à Copenhague en 2009, et plus récemment de la COP 21 en 2015 qui a conduit à la ratification de l'Accord de Paris. En plus de travailler à apporter une clé de compréhension de ces engagements climatiques au regard de la répartition des efforts de réduction des GES, je les confronte à l'objectif consensuellement arrêté comme étant la limite à ne pas dépasser afin de ne pas s'enfermer dans un schéma de conséquences irréversibles, à savoir une augmentation des températures globales ne dépassant pas 2°C. Il s'agit alors de contraintes d'émissions de GES ou de CO<sub>2</sub> imposées à l'échelle du monde. Ces contraintes peuvent également être exprimées par leurs « équivalences » au sens du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), à savoir en termes de concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> (ou de CO<sub>2</sub> équivalent, tenant alors compte des autres GES) ou de forçage radiatif. Placée alors sous contraintes environnementales, l'analyse du système énergétique mondial et de ses sous-systèmes régionaux permet de discuter diverses questions comme celles :

- des substitutions énergétiques et technologiques nécessaires à l'atteinte des objectifs climatiques,
- des technologies bas carbone les plus compétitives à moyen et long terme,
- des technologies de transition,
- de la réponse nucléaire ou des énergies renouvelables aux enjeux climatiques,
- du poids différencié de la politique climatique suivant les régions du monde,
- de la possibilité technologique d'atteindre des objectifs climatiques ambitieux,
- etc.

---

<sup>23</sup> GLYNN, J., FORTES, P., KROOK-RIEKKOLA, A., LABRIET, M., VIELLE, M., KYPREOS, S., LEHTILÄ, A., MISCHKE, P., DAI, H., GARGIULO, M., HELGESEN, P.I., KOBER, T., SUMMERTON, P., MERVEN, B., SELOSSE, S., KARLSSON, K., STRACHAN, N., GALLACHÓIR, B.Ó. (2015), *Economic Impacts of Future Changes in the Energy System—Global Perspectives*, in: Giannakidis, G., Labriet, M., Gallachóir, B.Ó., Tosato, G. (Eds.), *Informing Energy and Climate Policies Using Energy Systems Models*, Lecture Notes in Energy. Springer International Publishing, pp. 333–358.

GLYNN, J., FORTES, P., KROOK-RIEKKOLA, A., LABRIET, M., VIELLE, M., KYPREOS, S., LEHTILÄ, A., MISCHKE, P., DAI, H., GARGIULO, M., HELGESEN, P.I., KOBER, T., SUMMERTON, P., MERVEN, B., SELOSSE, S., KARLSSON, K., STRACHAN, N., GALLACHÓIR, B.Ó. (2015), *Economic Impacts of Future Changes in the Energy System—National Perspectives*, in: Giannakidis, G., Labriet, M., Gallachóir, B.Ó., Tosato, G. (Eds.), *Informing Energy and Climate Policies Using Energy Systems Models*, Lecture Notes in Energy. Springer International Publishing, pp. 359–387.

## **A. Décryptage des engagements climatiques post-Kyoto**

L'historique accord climatique adopté à Paris par les 195 parties à l'UNFCCC, le 12 décembre 2015, pour répondre au complexe défi de lutter contre le réchauffement climatique et ses répercussions, marque un tournant pour les économies au sens d'une transition globale vers un monde décarboné qui devrait s'accélérer. Soutenu par une large mobilisation de la société civile, des villes, des collectivités territoriales, d'entreprises et d'investisseurs, il fait suite à des décennies de négociations internationales et de divisions régionales quant aux contributions (attendues) à l'atténuation des émissions de GES des différentes régions du monde. La 21<sup>ème</sup> Conférence des Parties (COP 21) a ainsi marqué une étape décisive dans cette transition bas carbone, et ce d'autant plus que les pays ont appelé à un objectif à long terme plus ambitieux encore que de maintenir la hausse de la température globale en dessous de +2°C. En effet, un objectif de +1,5°C a été reconnu (sans formalisation) comme principal objectif à long terme de l'Accord de contenir, « l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels et en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation des températures à 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels, étant entendu que cela réduirait sensiblement les risques et les effets des changements climatiques » (Article 2.1(a)) ». Le GIEC a alors été mandaté par la COP 21 pour publier d'ici 2018 un rapport spécial sur « les conséquences d'un réchauffement planétaire supérieur à 1.5°C par rapport aux niveaux préindustriels et les profils connexes d'évolution des émissions mondiales de gaz à effet de serre ». En outre, ils ont reconnu la nécessité d'une réduction à un niveau zéro des émissions mondiales nettes de GES dans la seconde moitié du siècle, impliquant un retrait progressif de la consommation de combustibles fossiles à long terme « (...) pour parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle » (Article 4.1) ». Cet accord historique marque ainsi une étape importante pour la politique climatique internationale à venir en rassemblant la quasi-totalité des pays et surtout les plus gros émetteurs de la planète. Pour autant, il conserve encore, pour sa mise en œuvre, les traces des débats et enjeux mis en exergue lors des négociations des précédents accords. Mes travaux portent notamment sur la mise en perspective des contributions post-Kyoto des différentes régions du monde au regard d'une part du niveau de développement et de responsabilité dans le réchauffement climatique de ces dernières et d'autre part, du défi climatique global à remplir. Ils suivent ainsi ci-dessous le déroulé des négociations climatiques.

### **1. COP 15, 2009 – L'accord de Copenhague**

La Conférence des Parties de 2009 à Copenhague s'est tenue dans un contexte où depuis quelques années le débat climatique reposait non seulement sur un nombre croissant de preuves scientifiques montrant que l'atmosphère de notre planète se réchauffe en raison du niveau trop élevé des émissions anthropiques de GES, travaux publiés notamment dans le quatrième rapport d'évaluation du GIEC en 2007, mais aussi sur certains événements politiques majeurs, comme l'élection de Barack Obama en novembre 2008 avec des positions plus « vertes » exprimées par la nouvelle administration ou encore l'approbation du paquet climat de l'Union européenne par le Parlement européen en décembre 2008. Le Protocole de Kyoto qui avait été signé une dizaine d'année auparavant, en 1997, pour lutter contre le changement climatique ne visait que les pays industrialisés (figurant à l'annexe I, c'est-à-dire les pays industrialisés membres de l'OCDE en 1992, plus les pays à économie en transition, y compris la Russie, les pays baltes et plusieurs états d'Europe centrale et de l'est) et une réduction de 5 % des

émissions de GES sur la période 2008-2012. Pour la période post-Kyoto, c'est-à-dire après 2012, aucun accord international n'avait encore été conclu pour assurer une poursuite dans la lutte contre le changement climatique. Il était donc essentiel d'assurer la signature d'un accord mondial incluant tous les grands pays industrialisés (et principalement les États-Unis, qui n'avaient pas ratifié le Protocole de Kyoto) et, pour la première fois, les pays émergents dont les activités économiques et les perspectives démographiques constituent de véritables défis pour les décennies à venir. A long terme, une convergence notable existait entre les positions exprimées par l'Union européenne et le nouveau plan énergie Obama-Biden pour l'Amérique, cependant, l'accord sur les objectifs à moyen terme était loin d'être scellé. D'un côté, l'Union européenne s'était engagée à réduire ses émissions de dioxyde de carbone de 20 % par rapport à son niveau de 1990 d'ici à 2020 et était disposée à s'engager sur des efforts supplémentaires en cas de ratification d'un accord international, à savoir une réduction de 30 % des émissions d'ici 2020. De l'autre côté, l'objectif à moyen terme pour les États-Unis consistait en une réduction de 17 % par rapport aux niveaux de 2005 d'ici à 2020 mais ces derniers soulignaient l'impératif d'efforts d'atténuation des pays émergents comme la Chine et l'Inde au sens où des politiques d'atténuation devaient rapidement être menées dans ces pays qui représenteront une part majoritaire des émissions mondiales dans un proche avenir. En 2008, la Chine a en effet dépassé les États-Unis en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>. Naturellement, de telles positions laissaient beaucoup de place pour des négociations et une règle du jeu de Copenhague était : quelle contribution provenant d'autres parties est acceptable pour définir notre propre niveau d'engagement? L'Union européenne attendait ainsi des signes des autres pays développés et en particulier des États-Unis, qui attendaient à leur tour des signes positifs de contribution de la part de la Chine. En outre, un élément déterminant pour aboutir à un accord mondial en 2009 était de s'assurer que les pays industrialisés tiendraient leurs promesses d'aider les pays en développement à s'adapter aux impacts du changement climatique. Sans cela, les pays en développement vulnérables et fortement touchés par le changement climatique ne s'engageraient pas à réduire leurs propres émissions de GES. Les enjeux étaient importants et même si les négociations n'ont pas abouti à un accord global sur les réductions des émissions de gaz à effet de serre post-Kyoto, une très forte participation des pays tant développés qu'en développement lors de cette quinzième Conférence des Parties sur le changement climatique a pu être notée. La COP 15 a finalement abouti à un accord fixant l'objectif de limitation de la hausse de la température globale à +2°C et a invité les Parties à soumettre des engagements de réduction d'émissions de GES d'ici la fin janvier 2010. Bien que cet accord international n'ait pas répondu aux attentes, il a jeté les premières bases de la lutte mondiale contre le changement climatique post-Kyoto, ce qui n'était pas une tâche facile.

Dans le cadre de l'Accord de Copenhague, cinq groupes de pays peuvent être distingués au regard de leurs ambitions de politiques de réduction des émissions de GES à 2020 :

- Les pays ayant soumis des engagements d'atténuation absolue pour 2020 ;
- Les pays ayant soumis des engagements d'atténuation relative pour 2020 ;
- Les pays mettant en place des actions climatiques locales et soutenant la mise en place d'un accord global ;
- Les pays soutenant un accord global mais ne mettant pas en place d'actions de lutte contre le réchauffement climatique (61 pays, essentiellement les pays les moins avancés) ;
- Les pays ne s'associant pas à l'Accord ou n'ayant pas communiqué à ce sujet (51 pays, une majorité de pays producteurs de pétrole).

En vue d'une première implémentation de cet accord dans le modèle TIAM-FR, j'ai considéré trois groupes de pays. Le premier groupe comprend les Parties ayant des engagements de réduction en valeur absolue, il rassemble les régions Australie-Nouvelle Zélande (AUS), Canada (CAN), Japon (JPN), Europe (WEU+EEU), la Russie (FSU) et les Etats-Unis (USA) et représente 48 % des émissions de GES en 2005. Le deuxième groupe comprend les Parties ayant des engagements de réduction en valeur relative, il rassemble les régions Chine (CHI), Inde (IND), Mexique (MEX) et Corée du Sud (SKO) et représente 25 % des émissions de GES en 2005. Enfin, le dernier groupe rassemble toutes les Parties considérées comme n'ayant pas soumis d'engagement, à savoir les régions Afrique (AFR), Amérique Latine (CSA), Moyen-Orient (MEA) et les pays en développement d'Asie (ODA) qui représentent 27% des émissions de GES en 2005. Un premier travail dans le cadre de ces engagements climatiques fut de les retranscrire suivant une même clé de lecture (la table 9 présente les engagements bas lorsqu'il s'agissait d'objectif conditionnel). En effet, les différentes Parties se sont engagées en considérant des années de référence différentes (1990 par exemple pour l'Europe, 2005 pour les USA, 2000 pour l'Australie) et des types de réduction différents.

Table 9 : Scénario régional de réduction d'émissions de GES (Cibles basses à 2020)

Région	% de réduction d'ici 2020	Année de référence	Type de réduction	Gt CO <sub>2</sub> eq 2005	Gt CO <sub>2</sub> eq 2020	Evolution 2005-2020
<b>Groupe 1 : Cibles absolues</b>						
<b>AUS</b>	5 %	2000	Réduction du niveau des émissions	0,742	0,657	-11,4 %
<b>CAN</b>	17 %	2005		1,142	0,947	-17 %
<b>JPN</b>	25 %	1990		1,345	0,945	-29,71 %
<b>FSU</b>	15 %	1990		3,305	4,762	+44 %
<b>USA</b>	17 %	2005		7,072	5,869	-17 %
<b>Europe</b>	20 %	1990		5,65	4,891	-13,42 %
<b>Groupe 2 : Cibles relatives</b>						
<b>CHI</b>	40 %	PIB 2020	Intensité	6,917	8,965	+29,6 %
<b>IND</b>	20 %	PIB 2020	carbone	1,926	3,320	+72,32 %
<b>MEX</b>	30 %	2020	Scénario de	0,606	0,423	-30,15 %
<b>SKO</b>	30 %	2020	référence	0,556	0,427	-23,55 %

Ainsi, certaines Parties se sont engagées soit sur un objectif de réduction du niveau des émissions en 2020 par rapport à un niveau de référence (c'est le cas pour la plupart des pays industrialisés), soit sur un objectif de réduction du niveau des émissions en 2020 par rapport au niveau de référence autrement dit celui qui aurait pu être atteint sans la mise en place de mesures (le niveau cible est donc relatif au niveau exprimé dans un scénario de référence) ou encore sur une réduction de l'intensité carbone en 2020. C'est le cas de l'Inde et la Chine dont l'engagement de réduction ne porte pas sur le niveau d'émissions mais sur l'intensité du carbone (autrement dit le rapport PIB sur niveau d'émissions de CO<sub>2</sub>). Cela signifie que les PIB indiens et chinois vont continuer à augmenter mais que leurs émissions de carbone devront augmenter à un rythme plus faible en raison d'une plus grande efficacité énergétique et d'investissements dans des technologies plus vertes.

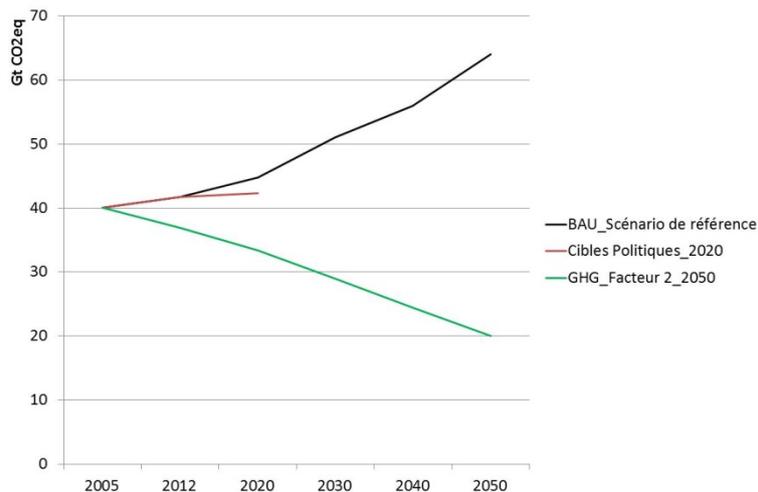


Figure 25 : Emissions mondiales de CO<sub>2</sub>eq

Ainsi, considérant les engagements (bas) pris par les différentes régions dans le cadre de l'Accord de Copenhague, les objectifs du premier groupe, regroupant la quasi-totalité des pays industrialisés, induiraient une réduction des émissions de GES sur la période 2005-2020 de 6,15 %, les émissions passant ainsi de 19 à 18 Gt. Les émissions du groupe 2 regroupant notamment la Chine et l'Inde, passeraient de 10 à 13 Gt sur la même période, soit verraient leur niveau ne s'accroître « que » de 31 %. Pour être en adéquation avec l'objectif ultime exprimé dans le cadre de l'UNFCCC de contenir la hausse de la température globale à +2°C, qui demanderait par exemple une division par deux des émissions en 2050 (IPCC, 2007), une trajectoire optimale au sens de TIAM-FR serait de réduire les émissions de GHG pour le premier groupe de 19 Gt en 2005 à 14,5 Gt en 2020 et celles du second groupe de 10 Gt en 2005 à 9,9 Gt en 2020, soit au moins une stabilisation des émissions au niveau de 2005. Autrement dit, les engagements pris par les différents pays dans le cadre de l'Accord de Copenhague ne sont pas suffisamment ambitieux à cette période temporelle pour se placer sur une trajectoire en ligne avec les enjeux climatiques (Figure 25). Les analyses publiées sur les engagements de Copenhague aboutissent à la même conclusion : même si les engagements nationaux pris à Copenhague reflètent un changement significatif par rapport aux scénarios tendanciels, ce changement est loin des recommandations du GIEC visant à limiter l'augmentation de la température mondiale à 2°C (Dellink et al. 2010, Casella et al., 2010, Criqui et Ilasca 2010, Stern et Taylor, 2010, van Vliet et al., 2010). En outre, dans cette trajectoire optimale et ambitieuse, tous les pays contribuent à l'effort de réduction des émissions de GES.

L'analyse de différentes trajectoires de réduction des émissions de GHG suivant les contributions des différents groupes de pays, tel qu'illustrée dans la figure 26, permet de discuter les efforts attendus par les pays pour suivre une trajectoire optimale (au sens de TIAM-FR) et surtout pour être en adéquation avec l'objectif de 2°C. Il en résulte un partage de l'effort différencié entre les régions, suivant leur engagement et donc leur niveau de développement mais aussi de responsabilité dans le réchauffement climatique, mais également un calendrier d'actions différent.

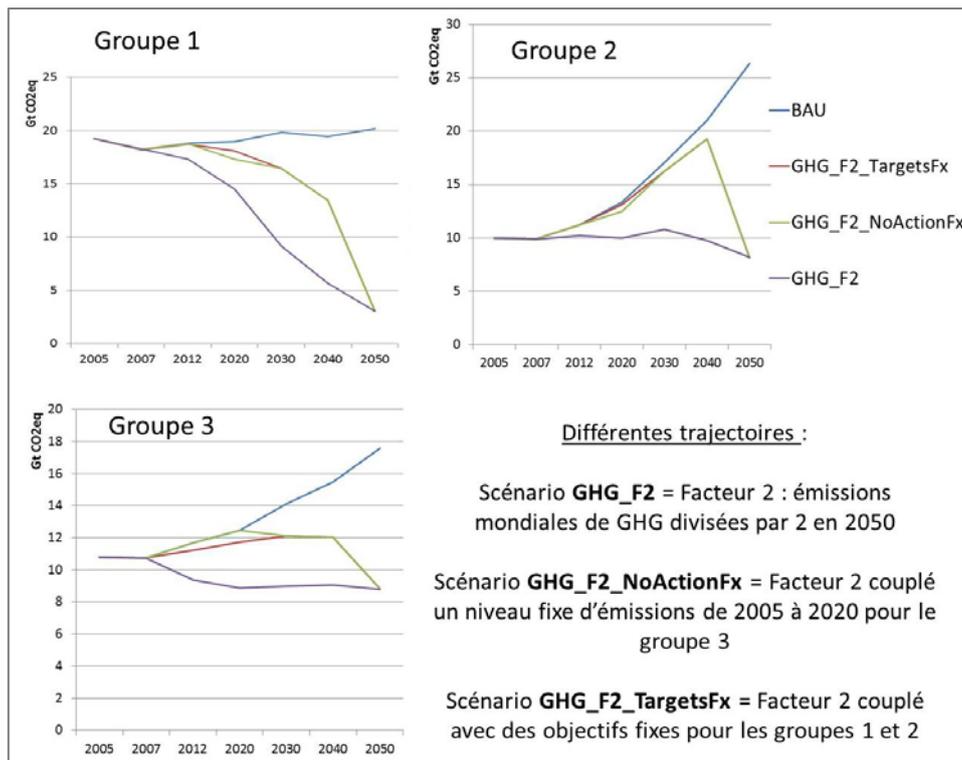


Figure 26 : Trajectoires de réduction d'émissions de GHG par groupe de pays

Il est intéressant de noter qu'un scénario exprimant une réduction des émissions mondiales suivant un facteur 2 de 2005 à 2050 en considérant une réduction maximale des émissions pour les groupes 1 et 2 à hauteur de leurs engagements dans l'Accord de Copenhague et sans contribution des pays du groupe 3, ne permet pas d'atteindre l'objectif de 2°C. La contribution des pays en développement apparaît comme une condition nécessaire pour atteindre un objectif climatique ambitieux. Ceci peut s'expliquer par la croissance future attendue de leur niveau d'émissions et par le fait que le système énergétique sur l'horizon temporel de ce groupe de pays induit des coûts d'abattement plus faibles. Ainsi, aucun pays ou groupe de pays ne peut résoudre à lui-seul, de par ses mesures, le problème du changement climatique. La coopération internationale est nécessaire face à l'ampleur du problème climatique tout en considérant celui de l'énergie ; les progrès technologiques devant également pouvoir répondre de manière adéquate aux ambitions des pays en élargissant le portefeuille de technologies disponibles et leur potentiel d'atténuation. Cela concerne non seulement les technologies de CSC, mais aussi les énergies non fossiles, comme l'éolien, le solaire, la biomasse, etc. Cela implique également la mise en place d'incitations et de régulations mais aussi des soutiens financiers et des transferts technologiques, deux autres piliers des négociations climatiques qui garderont une place déterminante dans l'accord suivant.

A l'issue de la COP 15, les négociations ont donc repris. La Conférence des Parties de Cancun en 2010 a d'ailleurs été déterminante pour la poursuite de ce processus pionnier dans l'histoire de nos sociétés au sens où « pour la toute première fois, les gouvernements de la quasi-totalité des pays travaillent ensemble dans le cadre d'un processus complexe qui questionne notre modèle d'organisation et nos économies et replace l'environnement, le développement humain ou encore la solidarité entre les peuples au cœur des enjeux » (IFDD, 2016). Parmi les points de tension, outre la question du financement et du transfert de technologies, celle de la répartition des contributions à

l'atténuation est restée cruciale, chaque Partie défendant les intérêts de son pays et les pays en développement appelant à l'équité et à la responsabilité commune et différenciée dans l'effort international de lutte contre le réchauffement climatique.

## **2. La responsabilité commune et différenciée et la question de l'équité**

Combattre le changement climatique exige ainsi un haut niveau d'implication et de coopération internationale, le challenge politique à relever était donc d'amener les pays à converger vers un accord global, multilatéral (et contraignant) comportant des cibles suffisamment ambitieuses de réduction des émissions de GES permettant de conduire les économies vers un monde bas-carbone. L'enjeu est d'autant plus de taille que le défi climatique auquel nous sommes confrontés nécessite une réduction drastique des émissions totales de GES tout en considérant la balance des droits et devoirs face au changement climatique qu'exprime le principe de responsabilité commune et différenciée. Ce principe retenu lors des conférences internationales sur le climat depuis le Sommet de la Terre de Rio de Janeiro en 1992 avait pour but de rééquilibrer les rapports Nord-Sud en considérant que « la responsabilité de l'élaboration et de l'application de stratégies, de politiques, de programmes et de mesures de développement social incombe à chaque pays et qu'il faut à cet égard prendre en considération la diversité des situations économiques, sociales et écologiques de chacun d'eux »<sup>24</sup>. La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques adoptée en 1992 repose ainsi sur deux principes fondamentaux que sont d'une part, la stabilisation des concentrations atmosphériques de GES à un niveau qui empêche toute perturbation humaine dangereuse du système climatique, et d'autre part, la responsabilité différenciée entre pays industrialisés et pays en développement, seuls les pays de l'Annexe I – principaux responsables de l'augmentation des GES dans l'atmosphère – devant alors s'engager à stabiliser en 2000 leurs émissions au niveau de 1990. Pour rappel, le Protocole de Kyoto fut le premier accord international dans lequel un groupe de pays (Annexe I du protocole) se sont engagés à atteindre des objectifs de réduction des émissions de GES sur la période 2008-2012<sup>25</sup>. Pour autant, son impact fut limité, en raison de la non-ratification par les États-Unis et du manque d'engagements de la part des pays émergents tels que la Chine et l'Inde. Le défi du Sommet de Copenhague en 2009 fut donc de déterminer les règles pour la période post-Kyoto en assurant la ratification d'un accord mondial sur des cibles de réduction plus ambitieuses permettant d'être en adéquation avec l'objectif de limitation de la température globale de +2°C. Bien que les négociations pendant le sommet n'aient pas abouti à cet accord mondial, l'Accord de Copenhague a posé les premières bases de la lutte mondiale contre le changement climatique post-Kyoto - ce qui n'était pas une tâche facile - en conduisant de nombreux pays, y compris pour la première fois les grands émergents, à s'engager à réduire leurs émissions sur la période 2013-2020, couvrant ainsi la période 2 du Protocole de Kyoto. Les décisions adoptées lors de la Conférence de Durban en 2011 ont ensuite rappelé le caractère urgent de la situation et souligné la nécessité d'augmenter radicalement le niveau d'ambition des engagements au-delà de 2020 en amenant notamment tous les pays à contribuer. Toute la question reste de déterminer le niveau de contribution de chacun.

---

<sup>24</sup> Déclaration de Copenhague, 1995, Rapport du Sommet mondial pour le développement social, paragraphe 28 : <http://www1.agora21.org/smds/smds.txt>

<sup>25</sup> Même s'il fut le fruit d'une large mobilisation internationale, je n'inclus pas le Protocole de Montréal relatif aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone (les chlorofluorocarbures). Adopté en 1985, cet accord international apparaît relativement simple par rapport aux processus complexes liés aux changements climatiques et aux émissions de GES, ces dernières touchant à tous les pans de nos économies.

J'ai alors analysé différentes configurations de coopération internationale et posé diverses hypothèses d'objectifs à horizon 2050 fondées sur des ambitions politiques annoncées par certains pays, des ambitions prévues ou des contributions « attendues », comme par exemple celles présentées ci-dessous. J'ai ensuite comparé ces trajectoires à un scénario global compatible avec l'objectif ultime de 2°C, où tous les pays sont contraints à contribuer à cet objectif d'atténuation globale. Les différents scénarios étudiés incluent des objectifs environnementaux pour différents groupes de pays sur la période 2005-2050 :

(1) **UNFCCC**: scénario climatique mondial exprimant une réduction de 50 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> en 2050 par rapport au niveau de 2000 (IPCC, AR4).

(2) Scénarios internationaux à horizon 2050 concernant les pays industrialisés (IND), les pays émergents (FDC) représentés ici par la Chine et l'Inde et les pays en développement (DEV) :

a. **IND80** : exprimant un engagement « bas » de réduction d'ici 2050 des IND, soit une réduction de 80 % de leurs émissions de CO<sub>2</sub> en 2050 par rapport à 2000, sans contrainte de réduction pour les FDC et DEV.

b. **IND95** : exprimant un engagement « haut » de réduction d'ici 2050 des IND, soit une réduction de 95 % de leurs émissions de CO<sub>2</sub> en 2050 par rapport à 2000, sans contrainte de réduction pour les FDC et DEV.

c. **IND/FDC80** : exprimant un engagement « bas » de réduction d'ici 2050 des IND et FDC, soit une réduction de 80 % de leurs émissions de CO<sub>2</sub> en 2050 par rapport à 2000, sans contrainte de réduction pour les DEV.

d. **IND/FDC95** : exprimant un engagement « haut » de réduction d'ici 2050 des IND et FDC, soit une réduction de 95 % de leurs émissions de CO<sub>2</sub> en 2050 par rapport à 2000, sans contrainte de réduction pour les DEV.

e. **IND/FDC80-DEV15**: exprimant un engagement « bas » de réduction d'ici 2050 des IND et FDC, soit une réduction de 80 % de leurs émissions de CO<sub>2</sub> en 2050 par rapport à 2000, avec une contrainte de réduction pour les DEV de 15 % en 2050 par rapport à un scénario de référence (BAU).

f. **IND/FDC95-DEV30**: exprimant un engagement « haut » de réduction d'ici 2050 des IND et FDC, soit une réduction de 95 % de leurs émissions de CO<sub>2</sub> en 2050 par rapport à 2000, avec une contrainte de réduction pour les DEV de 30 % en 2050 par rapport à un scénario de référence (BAU).

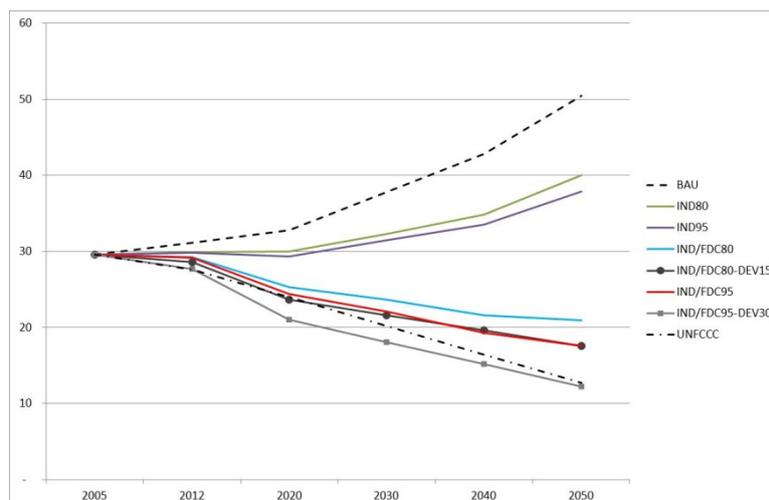


Figure 27: Emissions de CO<sub>2</sub> dans les scénarios régionaux de long terme (Gt CO<sub>2</sub>)

Comme le met en lumière la figure ci-dessus et confirmant les résultats précédents, pour être ambitieux, le futur régime climatique ne peut reposer uniquement sur les contributions des pays industrialisés (IND80 et IND95) même associées à celles des pays émergents (IND/FDC80 et

IND/FDC95). Ceci, en dépit d'engagements particulièrement importants comme dans le scénario IND/FDC95 avec une réduction de 95 % des émissions de CO<sub>2</sub> d'ici à 2050 par rapport au niveau de 2000. L'objectif UNFCCC est atteint dans le cas très contraignant mis en œuvre dans le scénario IND/FDC95-DEV30 où les pays en développement contribuent à la politique climatique d'atténuation en s'engageant à réduire leurs émissions en 2050 de 30% par rapport au niveau exprimé dans leur scénario de référence à la même période. Il est intéressant de noter que les scénarios IND/FDC80-DEV15 et IND/FDC95 suivent quasiment la même trajectoire de réduction d'émissions de CO<sub>2</sub>. Des contraintes d'atténuation plus faibles des pays industrialisés et des pays émergents peuvent ainsi être compensées par la contribution des pays en développement.

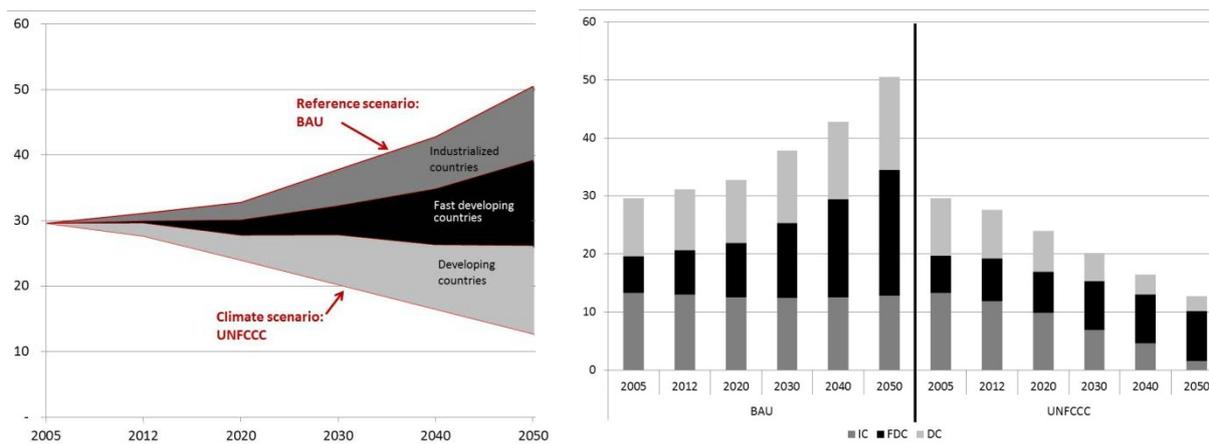


Figure 28: Contribution par groupe de pays à l'effort d'atténuation de CO<sub>2</sub> dans les scénarios UNFCCC et BAU (Gt CO<sub>2</sub>)

En particulier si on considère le scénario UNFCCC (figure 28), en 2050 les trois groupes de pays contribuent à la lutte contre le changement climatique suivant des niveaux quasiment égaux de réduction d'émissions de CO<sub>2</sub>, cela questionne l'équitable détermination de la contribution des pays en développement, notamment au regard des coûts à supporter pour développer une économie bas carbone. Leur participation est essentielle pour atteindre un objectif ambitieux, mais les pays industrialisés et les pays émergents doivent assumer leur responsabilité pour les émissions de CO<sub>2</sub> dont ils ont été, sont et seront responsables, et contribuer à la hauteur de leurs capacités.

A l'inverse, comme le montre la figure 29, dans le scénario IND/FDC95-DEV30 où les pays en développement voient leur contrainte carbone réduite, la contribution des pays émergents, soit plus précisément la Chine et l'Inde, est particulièrement importante. De 10 Gt de CO<sub>2</sub> émis en 2005, les pays en développement devraient limiter l'augmentation de leurs émissions de CO<sub>2</sub> en 2050 à 11 Gt dans le scénario IND/FDC95-DEV30, contre 16 Gt dans le scénario BAU. Même si la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> des pays émergents est plus forte que celle des pays industrialisés, 21 Gt de CO<sub>2</sub> évitées pour la Chine et l'Inde en 2050 par rapport au niveau 2050 du BAU, contre 13 Gt pour les pays industrialisés, il est important de noter le fait que le système énergétique de ces derniers est alors complètement décarboné en 2050.

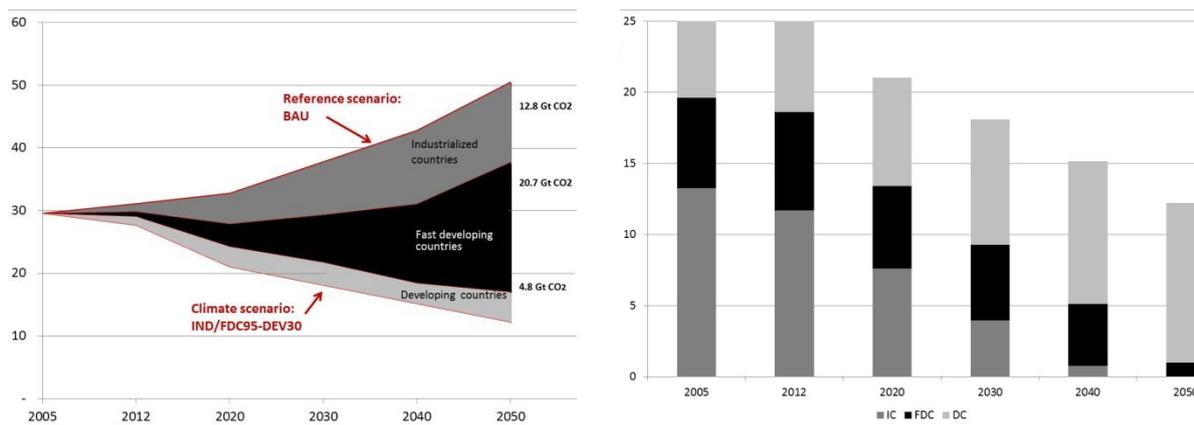


Figure 29: Contribution par groupe de pays à l'effort de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans le scénario IND/FDC95-DEV30 (Gt CO<sub>2</sub>)

Une politique climatique ambitieuse conforme au défi climatique du 2°C nécessite une contribution globale, que les pays soient industrialisés, émergents ou en développement. Il appartient avant tout aux pays industrialisés de s'acquitter de leur « dette écologique » vis-à-vis des pays en développement et de tenir leurs promesses de les aider à s'adapter aux impacts du changement climatique que ce soit au moyen de financements ou de technologies appropriés. Cette équité, reposant sur le fait que certains pays portent une plus grande responsabilité dans le problème du réchauffement climatique, exige qu'une répartition des efforts en matière d'atténuation se fasse au regard de cette responsabilité et de la capacité des pays à agir. Rien n'est ainsi certain quant au niveau possible de réduction des émissions de GES que les pays en développement pourront atteindre voire pourront accepter de cibler à long terme. La prise en charge par les pays industrialisés des coûts incrémentaux liés à la lutte contre le changement climatique constitue une demande forte des pays en développement au nom des responsabilités historiques en termes d'émissions, comme le rappelle François Gemenne (2010) ou encore plusieurs ONG de solidarité internationale comme CO<sub>2</sub> solidaire, le Réseau Action Climat, Coordination Sud, pour ce citer que celles-ci. En outre, plus les efforts d'atténuation seront importants, au plus tôt, moins les besoins de financements de l'adaptation le seront ; même si force est de reconnaître que ces derniers seront importants.

En termes de coûts, une plus grande contribution en matière d'atténuation dans les pays en développement apparaît moins onéreuse qu'une importante atténuation dans les pays industrialisés, comme l'indique les mécanismes flexibles mis en œuvre dans le cadre du Protocole de Kyoto. Les coûts d'atténuation sont en effet généralement plus faibles dans les régions dotées de centrales électriques et d'équipements anciens ou inefficaces et présentant un fort potentiel de croissance que dans les régions caractérisées par une production et une consommation d'énergie modernes et rationnelles et une demande d'énergie quasi-stagnante (Rogner, 2000). Le coût des mesures de réduction des émissions de GES variant ainsi fortement d'une région à l'autre, les mécanismes pour un développement propre (MDP) permettent de développer des projets de réduction d'émissions de GES là où les coûts d'abattement du carbone peuvent être plus faibles. Mécanismes de coopération, ils favorisent l'association de pays en développement et de pays industrialisés, les premiers parvenant ainsi à un développement durable et contribuant à l'objectif ultime de la Convention et les seconds remplissant leurs engagements de réduction de leurs émissions de GES. Pour autant, ceci ne suffit pas ; atteindre un objectif climatique ambitieux appelle des cibles elles-aussi ambitieuses provenant de

tous les pays. La capacité des pays en développement à mettre en œuvre des politiques de réduction des émissions doit être considérée au vu de leur priorité qui réside dans une problématique de développement et d'approvisionnement en énergie. Cette priorité a notamment été clairement annoncée par l'Inde. Les pays industrialisés doivent ainsi fournir les outils et les ressources pour relever les défis. De la même manière, il est impératif que les pays comme la Chine, l'Inde ou encore le Brésil qui représenteront dans un proche avenir une part prépondérante des émissions mondiales envisagent rapidement la mise en œuvre de politiques d'atténuation. Tels étaient les appels au cours de la COP 20 à Lima en 2014, où Rajendra Pachauri, Président du GIEC de 2002 à 2015, a déclaré son « espoir d'atteindre un niveau d'ambition et d'engagement pour donner à ce monde un avenir meilleur, plus durable et propre » et Christina Figueres, secrétaire exécutive à l'UNFCCC, « sa confiance sur le fait de voir déboucher la COP 21 sur un accord efficace ».

### **3. COP 21, 2015 – L'accord de Paris**

Le défi à relever demeurait ainsi de faire converger les pays vers un accord mondial et multilatéral permettant de tendre vers un monde bas carbone. Les négociations climatiques internationales se sont donc poursuivies jusqu'à conduire à la signature en 2015, lors de la 21<sup>ème</sup> Conférence des Parties, d'un nouveau cadre climatique international. Tous les pays ont en effet signé l'Accord de Paris dont l'ambition finale réside dans le fait que les contributions des différentes Parties permettent de contenir le réchauffement climatique « bien en dessous » de 2°C d'ici 2100 avec un renforcement des efforts permettant d'atteindre une cible de 1,5°C. Presque tous les pays ont ainsi soumis leurs intentions de contributions nationales au problème climatique (INDCs, Intended Nationally Determined Contributions), représentant près de 99 % des émissions mondiales de GES. L'accord de Paris est entré en vigueur le 4 novembre 2016, 55 Parties représentant au moins 55 % des émissions de GES mondiales l'ayant ratifié. A ce jour, il a été rejoint par 113 Parties représentant 79 % des émissions. La Chine a ainsi déclaré qu'elle atteindrait son pic d'émissions en 2030 et que d'ici là elle promettait de diminuer son intensité carbone de 60 à 65 % par rapport à 2005. Les États-Unis ont quant à eux déclaré qu'ils réduiraient leurs émissions de GES de 26 à 28 % d'ici 2025 par rapport à 2005 et l'Union européenne d'au moins 40 % d'ici 2030 par rapport à 1990. L'Inde devrait réduire l'intensité de GES de son PIB de 33 % à 35 % de 2030 par rapport à 2005. Compte tenu de ces INDCs et malgré la mobilisation internationale sans précédent, le monde pourrait encore se diriger vers une élévation comprise entre 2,7 et 3°C (Luomi, 2016) ou, selon Climate Action Tracker, entre 2,4 et 2,7°C dans le cas d'une mise en œuvre complète des INDCs. Ainsi, afin de s'assurer de demeurer sur une trajectoire compatible avec la limite de 2°C voire de 1,5°C, l'Accord de Paris exige que chaque pays réexamine ses INDCs tous les cinq ans à partir de 2020, sans possibilité de réduire les cibles à atteindre et avec encouragement pour les différents Etats d'être plus ambitieux. En outre, les émissions de GES devront atteindre leur niveau maximum le plus rapidement possible et les économies devenir quasiment neutres en carbone dans la seconde moitié de ce siècle.

J'ai ainsi commencé à analyser ces nouvelles trajectoires de réduction d'émissions, décrites jusqu'en 2030 (2025 pour les Etats-Unis) et les ai mises en perspective avec l'objectif ultime de long terme de 2°C, considérant que pour atteindre ce dernier il faudrait que les émissions mondiales de GES baissent de 40 à 70 % d'ici 2050 par rapport au niveau de 2010. Trois scénarios expriment ainsi cet objectif en fonction de ces différentes trajectoires incertaines développées dans les recommandations du GIEC :

- UNFCCC-40 : réduction de 40 % des émissions de GES d'ici à 2050 par rapport à 2010 ;
- UNFCCC-50 : réduction de 50 % des émissions de GES d'ici à 2050 par rapport à 2010 ;
- UNFCCC-70 : réduction de 70 % des émissions de GES d'ici 2050 par rapport à 2010.

Aux contributions nationales exprimées dans le cadre de l'Accord de Paris, dont j'ai considéré les objectifs faibles et élevés (conditionnels et inconditionnels) pour la période, j'ai associé des hypothèses sur les objectifs de 2050. Les différents scénarios étudiés comprennent ainsi des objectifs climatiques pour différentes régions du monde sur la période 2010-2050. L'analyse d'une combinaison de ces scénarios vise à fournir un cadre de compréhension du futur régime représenté par l'Accord de Paris. Cette combinaison nous donne les différentes tendances de l'ambition :

- NDCs-2050-lolo : objectifs bas d'atténuation d'ici 2030 et hypothèses basses d'ici 2050 ;
- NDCs-2050-loup : objectifs bas d'atténuation d'ici 2030 et hypothèses hautes d'ici 2050 ;
- NDCs-2050-uplo : objectifs hauts d'atténuation d'ici 2030 et hypothèses basses d'ici 2050 ;
- NDCs-2050-upup : objectifs hauts d'atténuation d'ici 2030 et hypothèses hautes d'ici 2050.

La table 10 présente les différentes cibles de nos 15 régions modélisées, en fonction de leurs engagements en vertu de l'Accord de Paris. Pour la Russie, j'ai considéré une réduction des émissions de 25 à 30 % d'ici 2030 par rapport à 1990. Pour le Mexique et la Corée du Sud, le niveau d'atténuation est fonction de leur scénario de référence, et représente une réduction des émissions de GES d'ici 2030 de 25 à 40 % pour le premier et de 37 % pour la seconde. Concernant l'Afrique, le Moyen-Orient et les autres pays en développement d'Asie, j'ai supposé une réduction des émissions de GES de 15 à 30 % d'ici 2030 par rapport à leur niveau de BAU. Pour l'Amérique latine, j'ai considéré les objectifs implémentés dans le modèle TIMES-ALyC, un modèle TIMES dédié à l'Amérique latine et les Caraïbes développé au CMA par Sébastien Postic dans le cadre de sa thèse que j'ai co-encadrée (Postic, 2015; Postic et al 2016). Plus précisément, chaque INDC a été implémenté individuellement dans TIMES-ALyC et j'ai pu en extraire le niveau agrégé de réduction des émissions de GES d'ici 2030 pour la région CSA, Central and South America, de TIAM-FR. Comme ce fut le cas pour les engagements pris lors de l'Accord de Copenhague, j'ai dans un premier temps traduit ces cibles de réduction suivant la même année de référence et suivant le même type de réduction. Il en résulte le niveau d'émissions de GES que les régions s'engagent à ne pas dépasser (niveau faible ou élevé) et l'évolution de ces émissions de 2010 à 2030 qui en résulte. Ainsi, l'Union européenne s'est engagée à réduire ses émissions de GES de 40 % d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 1990 ; cet engagement représente une réduction de 29,5 % d'ici 2030 par rapport à 2010, contre une réduction comprise entre 33,3% et 35% pour les États-Unis sur la même période.

La réduction de l'intensité carbone de la Chine de 60 % ou 65 % d'ici 2030 par rapport à 2005 équivaut à limiter la hausse de ses émissions de CO<sub>2</sub> à 15,5 % en 2030 par rapport à 2010 dans le cas faible et à 1,1 % dans le cas plus élevé. En Inde, entre 2010 et 2030, la limitation de l'augmentation de ses émissions de GES est de 133 % dans le cas faible et de 126 % dans le cas élevé. Pour rappel, l'engagement de la Chine et l'Inde porte sur une réduction de leur intensité carbone et donc dépend très fortement des projections de leur PIB. Notons la réduction significative que représentent les engagements mexicains et sud-coréens (sur la base d'un scénario de référence), soit respectivement une réduction de 22 % et 21 % en 2030 par rapport à 2010 dans le cas haut. En Amérique latine, les INDCs induisent une limitation accrue des émissions de GES, avec une augmentation sur la période

limitée à 15,3 % dans le cas faible et à 8,6 % dans le cas fort. Dans les pays d'Afrique, du Moyen-Orient et d'Asie, la cible haute d'atténuation implique une réduction des émissions de GES respectivement de 3,5 %, 5,5 % et 12,3 %, contre une augmentation limitée des émissions dans le scénario bas (17,1 %, 14,7 % et 6,5 %).

Table 10 : Contraintes de réduction d'émissions de GES soumis dans le cadre des INDCs

Région	% de réduction	Année de référence	Année cible	Type de réduction	Evolution 2010-2030 (Bas)	Evolution 2010-2030 (haut)
<b>Cibles absolues - Pays industrialisés</b>						
WEU-EEU	40 %	1990	2030		-29,5 %	
USA	26-28 %		2025	Réduction du niveau des émissions	-33,3 %	-35 %
AUS	26-28 %	2005			-26 %	-28 %
CAN	30 %		2030		-25,8 %	
JPN	26 %	2013			-25,5 %	
<b>Pays émergents</b>						
CHI	60-65 %	2005	2030	Intensité carbone	15,5 %	1,1 %
IND	33-35 %				133 %	126 %
<b>Cibles relatives - Pays en développement</b>						
FSU	25-30 %	1990			16,1 %	8,4 %
MEX	25-40 %				-2,6 %	-22,1 %
SKO	37 %			Réduction du niveau des émissions	-20,8 %	-20,8 %
AFR	15-30 %	Scénario de référence	2030		17,1 %	-3,5 %
MEA	15-30 %				14,7 %	-5,5 %
ODA	15-30 %				6,5 %	-12,3 %
CSA					INDCs résultant de TIMES-ALyC	15,3 %

Table 11 : Contraintes de réduction d'émissions de GES d'ici 2050

Région	% de réduction	Année de référence	Année cible	Type de réduction	Evolution 2030-2050 (Bas)	Evolution 2030-2050 (haut)
<b>Cibles absolues - Pays industrialisés</b>						
WEU-EEU	60-80 %	1990			-33,3 %	
USA	83 %	2005	2050	Réduction du niveau des émissions	-72,8 %	-72,1 %
AUS	60-80 %				-45,9 %	-72,2 %
CAN	60-80 %				-42,9 %	
JPN	60-80 %				2013	-45,9 %
<b>Pays émergents</b>						
CHI	Pic d'émission	2030	2050	Pic d'émission	0 %	
IND				Pic d'émission		
<b>Cibles relatives - Pays en développement</b>						
FSU	Pic d'émission	2030	2050	Pic d'émission	0 %	
MEX						
SKO						
AFR						
MEA						
ODA						
CSA						

Les engagements en matière d'atténuation des émissions de GES promis par les pays développés et en développement couvrent 99 % des émissions mondiales de 2005. Une importante question est de déterminer ce qui se passera après 2030. Pour se situer sur une trajectoire compatible avec une frontière de 2°C, l'accord de Paris exige que chaque pays réexamine ses engagements tous les cinq ans à partir de 2020, sans pouvoir réduire sa cible et en encourageant activement les Etats à faire mieux. Dans ce contexte, nous avons posé l'hypothèse de cibles (faibles et élevées) pour les pays industrialisés, soit plus précisément une réduction de 60 % et 80 % des émissions de GES d'ici 2050 par rapport à leur année de référence officielle. Pour les États-Unis, nous avons considéré l'objectif qu'ils avaient indiqué dans l'Accord de Copenhague (COP 15), soit une réduction de 83 % des émissions de GES d'ici 2050 par rapport à 2005. Dans ses objectifs, la Chine s'est engagée à atteindre son pic d'émissions d'ici à 2030. Pour toutes les autres régions du modèle, j'ai également supposé un pic d'émissions d'ici 2030. La table 11 présente ces différentes trajectoires.

L'analyse de ces différents scénarios nous éclaire sur le futur régime climatique qui devrait être suivi après 2020 et sur la répartition régionale des objectifs d'atténuation. Elle fournit un cadre pour comprendre le futur contexte climatique et les enjeux et attentes qui y demeurent notamment si on considère le fait que les engagements actuels ne sont toujours pas alignés avec l'objectif ultime ; ils sont même encore loin de la cible du « bien en dessous » 2°C. Pour autant, l'Accord de Paris initie une stabilisation des émissions de GES. Selon l'étude réalisée par l'UNFCCC sur ces INDCs (UNFCCC, 2016), « compared with global emission levels in 1990, 2000, and 2010, [GHG emissions] growth is expected to slow down substantially, to 16 (8-23) per cent in the 2010-2030 period compared with 24 per cent in the 1990-2010 period” and the “implementation of the communicated INDCs would lead to sizeably lower aggregate global emission levels than in pre-INDC trajectories ». La figure suivante met en avant cette stabilisation relative des émissions de GES d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 2010, tout comme la réduction drastique qui est attendue pour être conforme à l'objectif de 2°C, quelle que soit le niveau des scénarios UNFCCC. A long terme, bien que la direction semble correcte, le passage à un niveau supérieur d'ambition s'avère ainsi nécessaire.

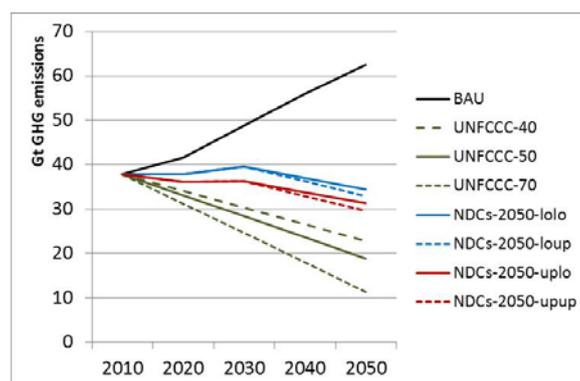


Figure 30: Trajectoires d'émissions de GES à long terme (Gt)

L'enjeu demeure de déterminer le niveau d'atténuation que chaque région devrait viser pour atteindre globalement une trajectoire bas-carbone consistante avec le défi climatique et l'objectif ultime de l'UNFCCC. D'ailleurs, au regard de l'accord de Paris, « les pays développés devraient continuer de montrer la voie en assumant des objectifs de réduction des émissions en chiffres absolus à l'échelle de l'économie. Les pays en développement devraient continuer d'accroître leurs efforts d'atténuation, et



13,4 Gt et les pays en développement de 7,6 Gt à 9,6 Gt. Dans NDCs-2050-lolo, les pays industrialisés représentent alors 37 % des émissions mondiales de GES, contre 39 % pour les pays émergents et 24 % pour les pays en développement en 2030, et respectivement 13 %, 45 % et 42 % en 2050. Dans NDC-2050-upup, les pays industrialisés représentent 35 % des émissions mondiales de GES contre 39 % pour les pays émergents et 26 % pour les pays en développement en 2030, mais respectivement 10 %, 48 % et 43 % en 2050. Cela met en évidence les limites de l'impact de la décarbonisation des pays industrialisés dans le but de réduire considérablement les niveaux d'émissions globales de GES et, de fait, l'importance de la contribution des pays en développement, de la Chine et de l'Inde.

Au niveau mondial, dans les scénarios UNFCCC, de 39,7 Gt à 51 Gt de GES doivent être évitées en 2050 pour atteindre l'objectif de 2°C. 43,5 Gt d'émissions de GES devraient être évitées dans le scénario de la UNFCCC-50 d'ici à 2050 par rapport au niveau du BAU. Ces efforts d'atténuation sont également le fait de contributions régionales différenciées, comme le montre la figure suivante.

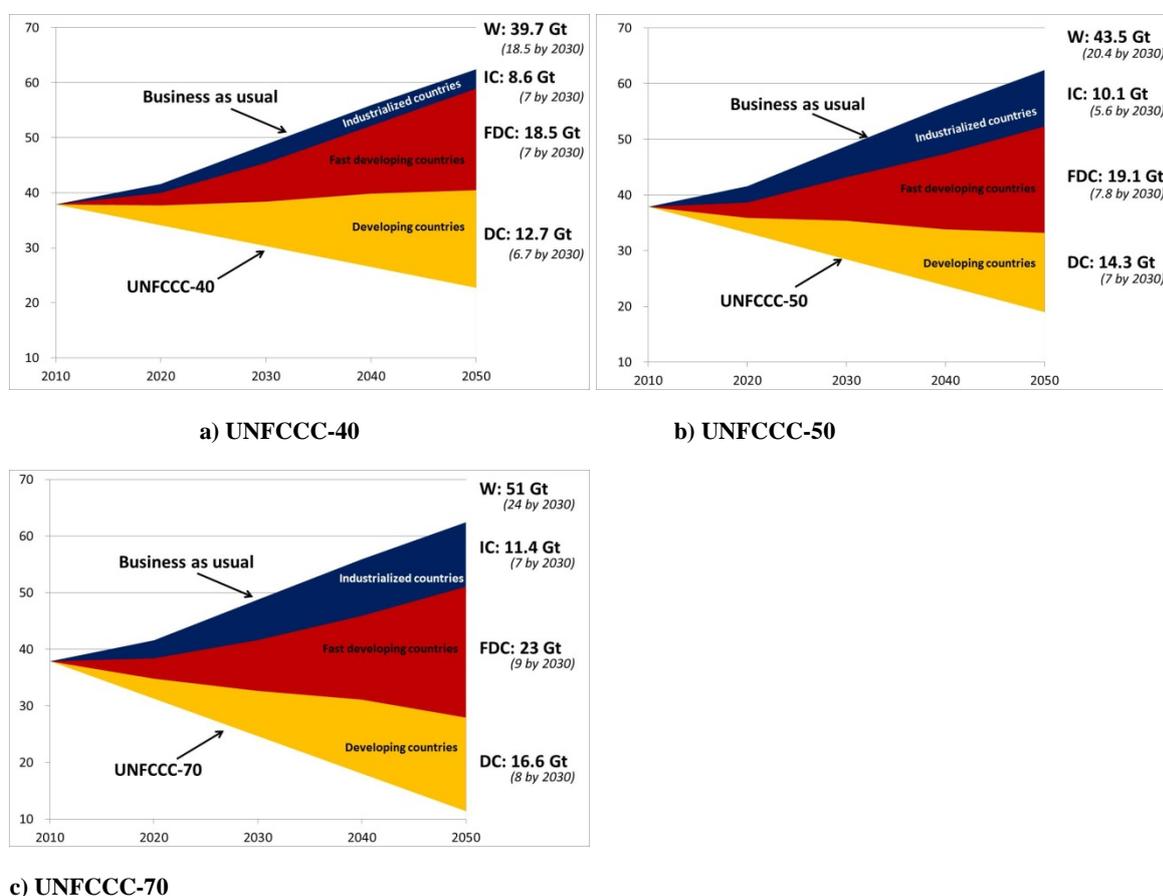


Figure 32: Contribution régionale aux réductions d'émissions de GES (Gt) dans les scénarios UNFCCC

Plus précisément, les pays industrialisés doivent alors respectivement réduire leurs émissions de GES de 8,6 Gt, 10,1 Gt et 11,4 Gt dans les scénarios UNFCCC-40, UNFCCC-50 et UNFCCC-70, les pays émergents de 18,5 Gt, 19,1 Gt et 23 Gt et enfin les pays en développement de 12,7 Gt, 14,3 Gt et 16,6 Gt. Le niveau de la contribution des pays émergents, mais aussi en grande partie des pays en développement, augmente particulièrement avec le niveau de contrainte exprimé pour l'objectif climatique global. C'est moins le cas pour les pays industrialisés, dont les contributions d'atténuation dans les scénarios INDCs sont relativement aux mêmes niveaux que celles exprimées dans les

scénarios globaux UNFCCC (en particulier UNFCCC-40 et UNFCCC-50). A ce niveau, le système énergétique des pays industrialisés est bien avancé en termes de décarbonisation et il semble difficile de réduire significativement davantage leurs émissions de GES. Il est à noter que ce niveau de contribution à l'atténuation correspond à celui des pays en développement dans les scénarios INDCs. Toutefois, force est de constater que l'égalité des contributions n'en assure pas l'équité.

Comme précisé précédemment, l'article 4 de l'Accord de Paris induit un retrait progressif à long terme de la consommation d'énergies fossiles ; la combustion de ces dernières constituant la principale source d'émissions de GES dans le monde. Les économies les plus avancées ont par exemple déjà inclus les énergies renouvelables dans leur système énergétique et ont prévu d'en accroître l'utilisation pour atteindre leurs objectifs d'atténuation. L'Union européenne, dans son paquet énergie-climat de 2014, s'est fixé comme objectif chiffré d'atteindre d'ici 2030 une part d'au moins 27 % d'énergies renouvelables dans son énergie consommée. Le Japon vise une production de son électricité à hauteur de 22 % à 24 % de sources renouvelables en 2030, la Chine d'atteindre un approvisionnement total en énergie primaire à 15 % d'origine non-fossile en 2020 et 20 % en 2030, et l'Inde s'est engagée à couvrir au moins 40 % de ses besoins énergétiques par des ressources renouvelables à l'horizon 2030. Les bioénergies sont également spécifiquement mises à contribution pour diversifier le mix énergétique et atténuer les émissions de CO<sub>2</sub>, comme en témoigne l'objectif indien sur les biocarburants, l'Inde souhaitant mélanger au minimum 20 % de biocarburants dans les carburants traditionnels (Kang et al., 2015<sup>27</sup>).

Plus généralement, les défis liés au changement climatique exigent une évolution du système énergétique dans le monde. Parmi les options bas-carbone, comme on l'a vu, la capture et le stockage du carbone (CSC) apparaissent dans les scénarios prospectifs comme une solution possible, sinon inévitable, pour atteindre des objectifs d'atténuation ambitieux et transiter vers un système à faible teneur en carbone. Ceci s'entend d'autant plus si on considère qu'en 2014, 40 % de l'électricité mondiale était produite à partir du charbon, soit 9 707 TWh dont 42 % en Chine, 18 % aux Etats-Unis et 10 % en Inde (IEA, 2016). Un de mes champs d'investigation touchant à la question des engagements climatiques internationaux consiste à discuter la plausibilité des différents objectifs fixés par les différentes régions au vu de leurs contextes technologiques, économiques ou encore politiques. Notamment, j'étudie l'évolution des systèmes énergétiques et les solutions qui sont déployées pour opérer une transition bas-carbone, ceci, toujours au moyen de TIAM-FR, le modèle d'optimisation long terme des systèmes énergétiques, qui permet d'analyser si ces scénarios climatiques sont réalisables techniquement.

## **B. Evolution des systèmes énergétiques**

Mon travail de recherche sur les politiques climatiques consiste également à en discuter les impacts sur les systèmes énergétiques. L'analyse de ces futurs possibles est à positionner au regard de l'évolution de ces systèmes et des stratégies déployées pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, ce que permet les modèles de la famille TIMES comme TIAM-FR de par leur grande richesse de caractérisation des différentes ressources, technologies ou encore usages énergétiques. Comme le rappelle le cinquième rapport du GIEC, miroir de la consommation la production d'énergie est le

---

<sup>27</sup> Cette question du développement des bioénergies est tout particulièrement traitée par Seungwoo Kang dans le cadre de sa thèse que je dirige au CMA.

premier grand responsable des émissions de GES ; la réduction de l'intensité carbone de la production d'électricité constitue donc un élément essentiel des stratégies d'atténuation. En outre, les émissions liées à l'énergie en plus d'être celles qui pèsent le plus lourd sont aussi les seules qui pourraient être complètement éliminées grâce aux technologies existantes. Mon analyse des objectifs climatiques internationaux est donc mise en perspective avec les solutions déployées pour opérer une transition bas-carbone. Dans le cadre de l'Accord de Copenhague, les résultats de l'optimisation de ces contraintes environnementales mettaient en avant l'accroissement des investissements dans les énergies renouvelables en particulier dans les pays en développement et les pays développés. En Chine et en Inde par contre, le développement des renouvelables était ralenti par les investissements dans les technologies de capture et stockage du carbone. Il est vrai que selon les leaders industriels (comme Asltom Power), la Chine était considérée comme le futur principal marché pour ces technologies de CSC (den Elzen et al. 2005). Dans les pays en développement et développés, on pouvait également noter une augmentation de l'énergie nucléaire dès 2020. La session suivante explore les choix technologiques possibles pour répondre à l'Accord de Paris. Elle sera suivie d'une discussion sur l'effet d'un choc sur les systèmes énergétiques dans un contexte de fortes contraintes climatiques et plus précisément de l'impact de Fukushima sur le secteur électrique européen. En effet, l'accident nucléaire de Fukushima au Japon en mars 2011 avait alors réactivé la discussion sur la manière d'atteindre des objectifs ambitieux d'atténuation, certains pays européens reconsidérant la contribution de l'énergie nucléaire dans leur mix énergétique.

## **1. La réponse technologique régionale à la transition bas-carbone issue de l'Accord de Paris**

La réduction des émissions de GES est obtenue grâce à des investissements dans des technologies bas-carbone et à des substitutions de combustibles. Les résultats de l'optimisation issue de TIAM-FR consistent notamment en l'évolution de la structure du système énergétique des régions étudiées sur l'horizon temporel donné, plus précisément le type, le niveau d'activité et la capacité des technologies. Dans le cadre de l'analyse des différentes trajectoires d'atténuation suivant l'objectif ultime de 2°C ou les engagements climatiques caractérisés dans les INDCs, j'ai été amenée à discuter la transition des différentes régions vers des économies bas-carbone et donc à me focaliser sur le système énergétique de ces dernières. En particulier, j'ai étudié l'évolution des moyens de production d'électricité dans les différents groupes de pays suivant leurs contraintes carbone.

S'agissant des scénarios précédemment présentés et caractérisant le régime climatique issu de l'Accord de Paris, sur l'ensemble de la période, dans le BAU, le mix énergétique mondial est dominé par les combustibles fossiles, suivis par l'hydroélectricité et le nucléaire, représentant respectivement 66 %, 18 % et 14 % de la production d'électricité en 2010 et respectivement 67 %, 16 % et 10 % de celle en 2050. Les énergies renouvelables représentent moins de 2 % de la production mondiale en 2010, leur part atteignant 7 % en 2050 dans le BAU (Figure 33). Lorsque les contraintes climatiques visent un objectif de 2°C, une décarbonisation importante du système électrique survient, quel que soit le scénario UNFCCC. Une telle transformation du système implique des investissements considérables dans les énergies renouvelables et dans les technologies de capture et de stockage du carbone. L'option CSC est particulièrement mise à contribution dans le scénario le plus contraignant, où elle apparaît dès 2030, contre dès 2040 dans le scénario UNFCCC-50 et dans une moindre mesure dans le scénario

UNFCCC-40. Ainsi, plus la contrainte climatique est forte, plus le développement de la CSC devient particulièrement important.

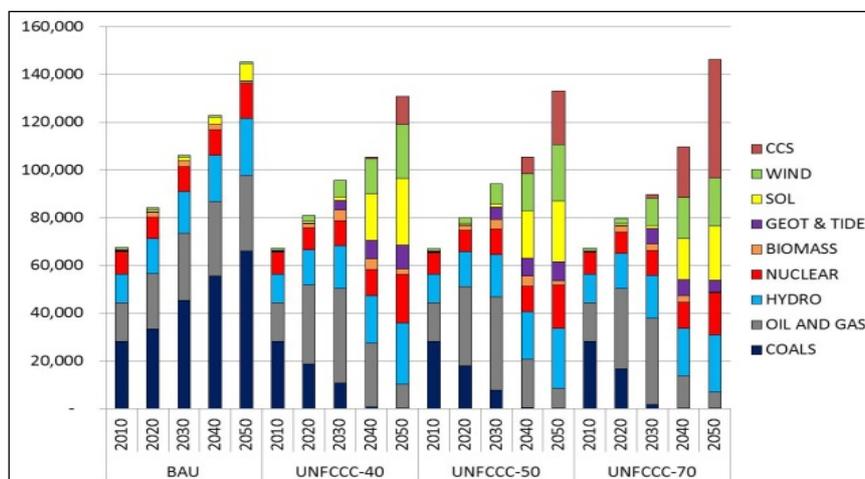


Figure 33: Production mondiale d'électricité par scénario global (PJ) – Trajectoires vers un monde décarbonisé

Considérant les scénarios INDCs, un résultat notable réside dans le fait que la technologie CSC n'est pas développée dans ce contexte contraint. Pour atteindre l'objectif climatique, la décarbonisation du système d'énergie résulte de l'intégration des énergies renouvelables, que les engagements climatiques soient d'ampleur basse ou haute. La production de l'électricité à partir de charbon est certes considérablement réduite sur la période, mais les centrales thermiques brûlant des combustibles fossiles pétrole et gaz sont encore utilisées pour produire de l'électricité (Figure 34). Dans le scénario NDC-2050-lolo, les combustibles fossiles représentent 33 % en 2050. L'hydroélectricité et le nucléaire représentent quant à eux respectivement 19 % et 11 % en 2050. Les énergies renouvelables atteignent alors 35 % du mix électrique (incluant la géothermie, les énergies des mers et des vagues) et les centrales biomasse génèrent alors 2 % de l'électricité mondiale. Dans NDC-2050-upup, en 2050, les combustibles fossiles ne représentent plus que 22 %, l'hydraulique 19 % et le nucléaire 14 %. Les énergies renouvelables atteignent pour leur part 41 % et la biomasse 3 %.

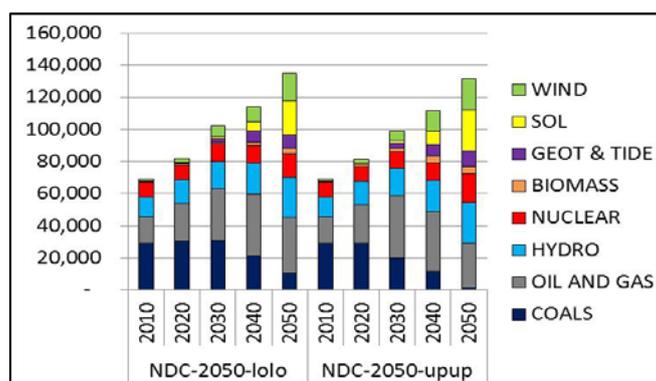


Figure 34: Production mondiale d'électricité par scénario (PJ) – Trajectoires issues de l'Accord de Paris

A titre de comparaison avec les scénarios UNFCCC, en 2050, la production mondiale d'électricité renouvelable représente 47 % dans UNFCCC-40, 43 % dans UNFCCC-50 et 32 % dans UNFCCC-70.

Les technologies CSC représentent respectivement 9 %, 17 % et 34 % dans ces mêmes scénarios. Le développement des technologies CSC est, dans une large mesure, associé à la biomasse (BECSC) en vue de bénéficier des émissions négatives, tel que présenté précédemment. Une question intéressante est alors de déterminer si les technologies de CSC restent concurrentielles face aux énergies renouvelables si les technologies de BECSC ne sont plus déployées (Figure 35).

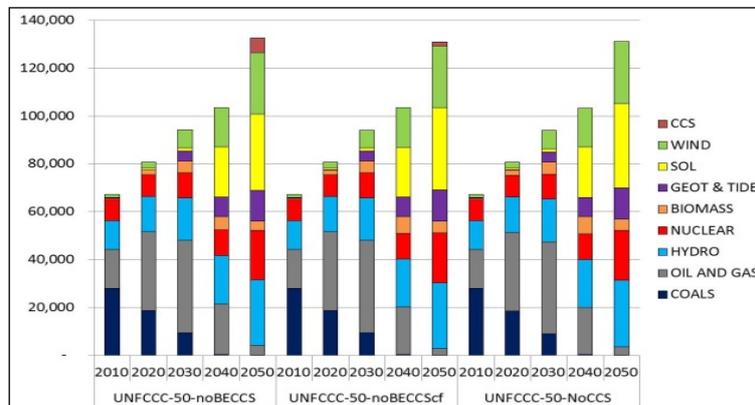


Figure 35: Production mondiale d'électricité par scénario (PJ) – Sensibilité à la disponibilité de la BECSC

En mettant l'accent sur le scénario climatique global intermédiaire, UNFCCC-50, la figure ci-dessus met en évidence le mix électrique en fonction de la disponibilité technologique de la CSC. Plus précisément, dans le scénario UNFCCC-50-noBECCS, la BECSC est interdit, mais la CSC dans les centrales thermiques fossiles est autorisée, y compris dans les centrales à cogénération charbon/biomasse. Dans le scénario UNFCCC-50-noBECCSf, la BECSC est interdit, tout comme la cogénération charbon/biomasse, mais la CSC dans les centrales thermiques fossiles est autorisée. Dans le scénario UNFCCC-50-noCCS, la CSC est interdit, quel que soit le type de centrale. Il est alors intéressant de noter que l'interdiction de la BECSC n'est pas compensée par un développement accru des technologies de CSC fossiles, mais par une augmentation des énergies renouvelables. Dans le scénario UNFCCC-50-noBECCSf, la CSC à base fossile représente une petite part des options d'atténuation mises en œuvre et la part des énergies renouvelables augmente alors.

Tout comme la contribution à l'atténuation varie selon les régions - entre pays industrialisés, pays émergents ou pays en développement - il en va de même des choix technologiques destinés à faire face aux contraintes climatiques et à l'évolution du système énergétique en résultant. La figure ci-dessous met en évidence le mix énergétique en 2050 dans les pays industrialisés selon les différents scénarios mis en œuvre dans cette étude (Figure 36). Entre autres résultats intéressants, force est de constater le développement significatif des technologies de CSC dans les scénarios UNFCCC où elles représentent respectivement 38 %, 16 % et 5 % de la production électrique dans UNFCCC-70, UNFCCC-50 et UNFCCC-40, et le fait que dans ces régions, les investissements dans la CSC ne sont mis en œuvre que si ces technologies sont associées à la biomasse et donc aux émissions négatives. Ainsi, la CSC n'est pas déployé si la BECSC n'est pas autorisé. Par contre, dans ce cas, dans le scénario UNFCCC-50-noBECCS, la biomasse reste une solution à la politique bas-carbone dans la mesure où des investissements sont alors réalisés dans les centrales biomasse. Dans les scénarios INDCs, la réduction des émissions de GES implique un développement plus important des énergies renouvelables, mais

pas des technologies CSC, quelles que soient les ressources biomasse ou fossiles considérées dans les centrales.

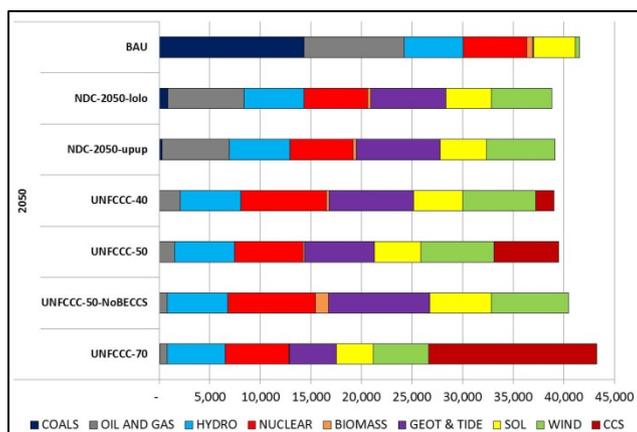


Figure 36: Production d'électricité dans les pays industrialisés (PJ) en 2050

Dans les pays émergents, ici la Chine et l'Inde, des investissements significatifs sont effectués dans les technologies de CSC et en particulier dans la BECCS (Figure 37). L'ampleur des contraintes climatiques mises en œuvre par ces régions implique de bénéficier des émissions négatives. Contrairement aux pays industrialisés, si la BECCS est interdit, l'Inde et la Chine continuent de développer des technologies de CSC, et dans une plus grande mesure en investissant dans des centrales à co-combustion dans le scénario UNFCCC-70-NoBECCS. Dans UNFCCC-70-NoBECCS<sub>cf</sub>, les technologies CSC restent une option importante pour atteindre les contraintes de carbone. Il est à noter que les énergies renouvelables sont largement développées dans tous les scénarios de contraintes climatiques, même dans les scénarios INDCs où par contre les technologies de CSC ne sont pas développées.

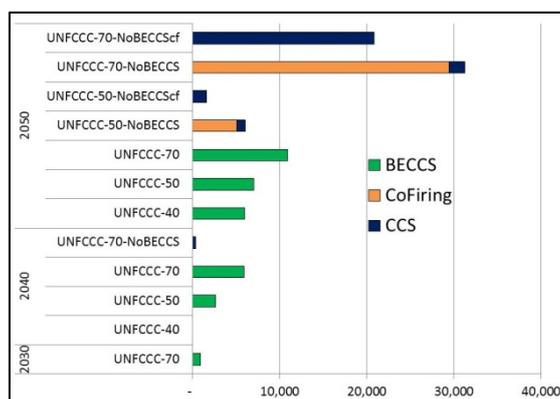


Figure 37: Production d'électricité par des centrales avec CSC en Inde et en Chine (PJ)

Dans les pays en développement, comme le montre la figure ci-dessous, la décarbonisation du système énergétique induite par les différentes trajectoires climatiques étudiées est possible grâce au développement significatif des technologies de CSC dans les scénarios mondiaux UNFCCC et à l'intégration des énergies renouvelables dans les scénarios INDCs. En 2050, dans NDC-2050-lolo, les énergies renouvelables représentent 9 % de la production d'électricité et 19 % dans NDC-2050-upup. L'hydroélectricité représente respectivement 33 % et 34 % dans ces scénarios. Quant aux combustibles fossiles, ils restent une ressource dominante pour produire de l'électricité dans le scénario exprimant

des engagements faibles, même si le charbon disparaît quasiment. Dans les scénarios UNFCCC, la CSC représente 48 % du mix énergétique dans le scénario le plus contraignant, contre 25 % et 11 % dans les scénarios climatiques qui le sont moins. La BECSC représente une part significative de l'investissement en CSC dans ces scénarios.

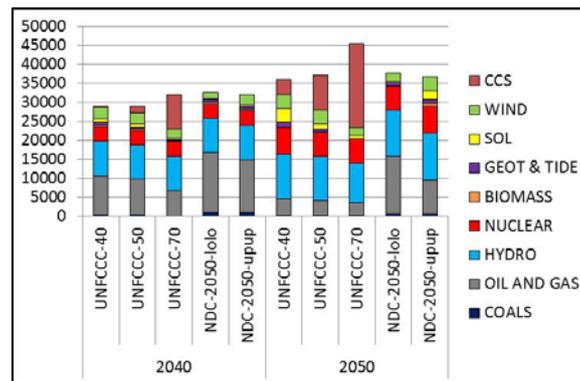


Figure 38: Production d'électricité dans les pays en développement (PJ)

Ainsi, comme précisé précédemment, parmi les options technologiques bas-carbone, les technologies de capture et stockage du carbone sont largement présentées comme une solution permettant d'atteindre des objectifs climatiques ambitieux. Les incertitudes et les controverses persistantes apparaissent ainsi être contrebalancées par le fait que les combustibles fossiles devraient rester la principale source d'énergie au cours des prochaines décennies alors même qu'en parallèle des réductions (progressivement) drastiques d'émissions de GES sont attendues dans le cadre de l'UNFCCC pour faire face au changement climatique. Le challenge de l'Accord de Paris est de soutenir les pays dans cette transition vers un nouveau monde bas-carbone alors qu'existe encore un fossé significatif entre les ambitions des pays qu'expriment leurs engagements et l'objectif ultime de maintenir la hausse des températures à +2°C. Il peut être qualifié d'être le plus grand succès diplomatique mondial en matière de lutte contre le changement climatique de part l'institutionnalisation d'un nouveau paradigme qu'il engendre (Bodansky, 2016). Pour davantage atténuer les émissions de GES, une mesure clé du succès est donc de savoir dans quelle mesure et à quelle vitesse l'Accord de Paris encouragera des actions plus ambitieuses (Luomi, 2016). Des objectifs ambitieux et réalistes doivent ainsi être discutés en fonction d'un changement technologique réaliste et suivant la disponibilité des solutions technologiques, ceci dans toutes les régions du monde. Ces discussions portent notamment sur des solutions à long terme, comme le développement des technologies CSC ou des énergies renouvelables, en réponse à une contrainte qui influe sur le mix énergétique.

L'objectif de ce travail de recherche est de souligner les défis posés par ce développement technologique qui est également un facteur critique pour le futur régime climatique international. Les résultats précédents mettent en avant que la réponse aux contraintes carbone repose pour une large part en des investissements dans les technologies CSC. Cependant, la faisabilité d'éviter autant de Gt de CO<sub>2</sub> en investissant dans ces technologies reste encore discutable. L'utilisation potentielle de ces technologies pourrait-elle suffire à satisfaire la contrainte climatique ? Cette question a déjà été posé précédemment au regard du potentiel de stockage du carbone notamment.

Cette question de plausibilité concerne également les énergies renouvelables. Dans l’approvisionnement total en énergie primaire, les parts d’énergies renouvelables, de biomasse et de biocarburants peuvent apparaître élevées. Elles pourraient augmenter de manière significative avec une cible encore plus stricte, mais cela dépend du coût et de l’efficacité des technologies renouvelables et de leur comparabilité avec les combustibles fossiles. Leur développement technologique futur reste une variable incertaine qui doit être prise en compte. Une intégration massive des énergies renouvelables intermittentes ne pourraient se faire sans investissement dans des technologies de stockage. Compte tenu de la courbe de réduction de McKinsey, un vaste portefeuille de technologies est disponible, certaines d’entre elles apparaissent financièrement avantageuses mais d’autres demeurent compliquées et coûteuses (Spiegel, 2015a, b). La CSC est encore très coûteux, mais pour l’AIE, le nouveau projet canadien Quest de stockage du CO<sub>2</sub> initialement conçu pour réduire les émissions provenant des sables bitumineux, fournit une nouvelle preuve que la CSC peut aider à réduire les émissions de GES. Pour autant, la question est de savoir si les entreprises privées sont prêtes à investir dans des projets CSC. Dans une étude sur les compagnies pétrolières norvégiennes, Emhjellen et Osmundsen (2013) montrent qu’un projet de CSC est peu susceptible d’être mis en œuvre par une entreprise privée en raison de la valeur actuelle nette négative des projets CSC. Les projets pétroliers intégrant des technologies de CSC ne sont devenus rentables qu’avec l’introduction d’une subvention considérable (68% des investissements). Déployer ces technologies à cette échelle à des fins d’atténuation nécessite ainsi la mise en œuvre de politiques incitatives ainsi que d’un cadre réglementaire pour appuyer les modèles économiques (Rai et al., 2010). Cela implique que les gouvernements jouent un rôle décisif dans les technologies de CSC. L’AIE, dans sa dernière édition de « Perspective des technologies de l’énergie » (ETP), précise que des progrès modérés avaient été enregistrés en 2015 dans le domaine de la CSC et que tant l’industrie que les gouvernements devront investir de façon significative dans les projets et le développement technologique pour faire en sorte que la CSC atteigne l’objectif escompté en termes de stockage annuel de CO<sub>2</sub> (AIE, 2016). Un développement significatif de la CSC impliquera également que les sites de stockage soient socialement acceptables. Il sera également déterminant de tenir compte du fait que les avantages des émissions négatives dus à la BECSC ne sont effectifs qu’en cas d’utilisation durable de la biomasse. Dans ce domaine, la restauration et la préservation des forêts est un autre facteur clé, tout comme tant d’autres défis restent à surmonter.

Pour atteindre une contrainte climatique ambitieuse en ligne avec l’objectif de 2°C, l’ampleur du défi technologique doit être évaluée. Et pour répondre à ces questions, l’Accord de Paris envoie aux décideurs, aux investisseurs et aux milieux d’affaires un signal clair vers la décarbonisation. Toutefois, la question reste de la capacité (institutionnelle) des pays en développement de soutenir un système énergétique décarboné et de la volonté des pays industrialisés de les soutenir. Les économies en développement et émergentes doivent faire face à un double défi énergétique : « répondre aux besoins de milliards de personnes qui n’ont toujours pas accès à des services énergétiques basiques et modernes tout en participant simultanément à une transition mondiale vers des systèmes énergétiques propres et peu polluants » (Ahuja et Tatsutani, 2009). Dans ce contexte, les technologies plus efficaces ne seront généralement pas le premier choix et le choix d’un système décarbonisé “will depend to a large extent on how quickly developed and developing countries recognize and begin to act upon their shared stake in achieving positive outcomes that can be managed only by working together” (ibid.).

## 2. L'impact de Fukushima sur le secteur électrique européen

En mars 2011, l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi au Japon a suscité un débat international sur l'avenir de l'énergie nucléaire et a fourni l'occasion d'organiser l'approvisionnement énergétique d'une manière plus durable (Netzer et Steinhilber, 2011). En Europe, il a conduit à des réponses politiques énergétiques contrastées. Plusieurs pays ont pris la décision d'abandonner la production d'énergie nucléaire, tandis que d'autres ont réaffirmé leur intention de maintenir ou d'augmenter leur capacité. Sur les 15 pays européens qui possèdent actuellement l'énergie nucléaire, l'Allemagne, la Suisse et la Belgique ont été confrontés à une forte réaction du public qui les a amenés à reconsidérer son rôle dans le mix énergétique. L'Allemagne a alors fermé huit centrales et il a été décidé que les neuf restantes seraient éliminées d'ici 2022. Le gouvernement suisse a quant à lui annoncé son intention de fermer ses cinq centrales nucléaires de 2019 à 2034. Enfin, en juillet 2012, le gouvernement belge a confirmé la sortie prévue de deux des sept réacteurs du pays. En revanche, les autres pays européens ont continué de soutenir la production d'énergie nucléaire. La France a décidé un renforcement des tests de résistance. Le Royaume-Uni, la Finlande, la Bulgarie, la Hongrie et la Roumanie ont confirmé leur engagement en faveur de l'énergie nucléaire en annonçant leurs projets de construction de nouveaux réacteurs (Conseil mondial de l'énergie, 2011). Selon l'Agence internationale de l'énergie atomique, en dépit de Fukushima, l'énergie nucléaire représentera toujours une part importante du mix énergétique mondial vers 2030, avec un potentiel de croissance annuel de l'ordre de 2,2 %. Cette évolution a certes été légèrement réduite mais elle demeure significative (AIEA, 2011). Au niveau de l'Union européenne, l'accident de Fukushima a entraîné une légère modification des hypothèses de politique nucléaire dans la feuille de route énergétique de la Commission européenne. En effet; alors que le scénario de référence pre-Fukushima faisait l'hypothèse d'une part du nucléaire de 26,4 % dans la production d'électricité d'ici à 2050, le scénario post-Fukushima prévoyait alors une part constante de 20,5% en 2030 et 2050 (Vasakova, 2011 ; Blohm-Hieber, 2012). Ces hypothèses auront un impact sur la structure du mix électrique car l'incident conduit les pays à faire des choix technologiques structurels à très long terme. En outre, les politiques d'atténuation du changement climatique influenceront également profondément l'évolution du futur marché européen de l'électricité. A cette période, l'objectif était en effet une réduction de 20 % des émissions de GES d'ici 2020 et de 80 à 95 % d'ici 2050 par comparaison aux niveaux de 1990. Afin de répondre à ces objectifs et de satisfaire une demande croissante d'énergie à un coût raisonnable, les technologies de production d'électricité à bas-carbone, telles que les centrales à cycle combiné gaz à haut rendement énergétique, le nucléaire, les énergies renouvelables et les technologies de capture et de stockage du carbone entreront alors en compétition dans le secteur de l'électricité (EC, 2012).

Dans ce contexte de politique climatique et d'acceptation sociale et politique réduite de l'énergie nucléaire dans certains pays européens, j'ai évalué l'impact de la réduction voire du retrait progressif du nucléaire sur l'évolution du mix électrique et ai notamment cherché de répondre à la question de savoir si la CSC pouvait constituer un bon substitut à l'énergie nucléaire pour décarboniser le secteur de l'électricité ? Bien avant l'accident de Fukushima, plusieurs études ont analysé les effets d'une sortie du nucléaire sur les prix de l'électricité et les émissions de carbone. Ils ont observé une hausse des prix de l'électricité, un déclin des exportations d'électricité et une augmentation des émissions de carbone attribuables à la substitution nucléaire des centrales à combustibles fossiles (Hoster, 1998 ; Nakata, 2002). Néanmoins, le contexte environnemental est également à prendre en considération au moment d'envisager une possible sortie du nucléaire. Dans un scénario climatique fortement

contraignant, les modèles tendent à favoriser un déploiement accru de l'énergie nucléaire (Tavoni et van der Zwaan, 2011). Par conséquent, la limitation du déploiement nucléaire entraîne une augmentation du coût économique du système. Lorsque la CSC est disponible, des études montrent qu'il devrait être largement mis en œuvre pour diminuer le coût de réalisation d'objectifs d'atténuation faible, car il apparaît être un bon substitut à l'énergie nucléaire (McJeon et al., 2011 ; Mori, 2012 ; Tavoni et van der Zwaan, 2011). Cette analyse constitue une contribution à ce sujet en mettant l'accent sur l'Europe. Elle met en évidence le potentiel de la CSC et de la BECSC pour aider à atténuer le changement climatique tout en faisant face à une résistance sévère au développement du nucléaire.

Ainsi dans cette étude, différents scénarios ont été implémentés afin d'analyser l'impact sur l'évolution du mix électrique, des objectifs européens de réduction des émissions, des recommandations en matière de politique nucléaire formulées dans la dernière feuille de route de l'Europe à horizon 2050 et d'une éventuelle sortie du nucléaire.

- **BAU** : scénario de référence sans politique climatique ni énergétique.
- **EU\_preFuku** : scénario combinant politique environnementale et nucléaire rigoureuse, comme annoncé dans la feuille de route de l'Europe. Dans ce scénario, les émissions européennes de CO<sub>2</sub> doivent diminuer de 20 % d'ici à 2020 et de 80 % d'ici à 2050 par rapport aux niveaux de 1990. L'énergie nucléaire européenne est quant à elle fixée de manière exogène pour représenter 26,5 % de la production d'électricité en 2050. En outre, les émissions de CO<sub>2</sub> mondiale sont réduites de 50 % en 2050 par rapport au niveau de 2005 afin d'être cohérent avec un objectif de 2°C.
- - **EU\_postFuku**: contrainte environnementale identique que dans EU\_preFuku. Par contre, l'énergie nucléaire est fixée de manière exogène pour représenter 20,5 % de la production d'électricité en 2030 et 2050, au lieu de 26,5% dans le scénario pre-Fukushima

Afin de discuter des évolutions alternatives du système électrique, deux autres scénarios présentent des contraintes de disponibilité technologique :

- **EU\_NoNuclear** : objectif environnemental identique que dans EU\_postFuku et EU\_preFuku. Cependant, une sortie progressive du nucléaire en Europe est étudiée. Les investissements dans de nouvelles centrales nucléaires ne sont alors pas autorisés pendant la période. La durée de vie des centrales nucléaires étant de 40 ans, les centrales nucléaires existantes ferment donc à la fin de leur durée vie.
- **EU\_NoCCS** : les technologies de capture et séquestration du carbone ne sont pas disponibles sur l'horizon temporel. Les contraintes climatiques sont celles qui sont exprimées dans les scénarios avant et après Fukushima et la politique nucléaire est la même que dans EU\_postFuku.

Entre autres éléments de contexte, les émissions de CO<sub>2</sub> européennes représentent alors 17 % des émissions mondiales en 2005 et 11 % en 2050 dans le BAU. Dans les scénarios de contraintes, elles représentent 7 % en 2050, soit 0,9 Gt. Alors que dans le BAU, 70 % de l'électricité est produite par des centrales à énergie fossiles, les contraintes climatiques induisent un changement significatif dans la structure du mix électrique en 2050, caractérisé par une transition vers une société bas-carbone. L'effet direct est une forte réduction de la production d'électricité par des centrales à charbon et à gaz sans CSC. Un nouveau choix technologique est alors opéré en faveur des renouvelables et de la CSC dès 2020. En 2050, 38 % de l'électricité européenne est produite par des centrales avec CSC (fossiles et biomasse) dans le scénario EU\_preFuku et 43 % dans EU-postFuku. Les renouvelables représentent

quant à elles 26 % de la production d'électricité dans ces scénarios. Ainsi la politique post-Fukushima induit une hausse du nombre de centrales électriques avec CSC, laissant entendre que ces technologies pourraient constituer un bon substitut au nucléaire en cas de politique climatique ambitieuse, et ce davantage que les énergies renouvelables, même si ces dernières jouent également un rôle dans la transition énergétique. Ce choix technologique est amplifié dans le scénario de non-renouvellement du parc nucléaire à savoir dans UE\_NonNuclear où la part de la CSC atteint 57 % en 2050. L'électricité renouvelable représente dans cette configuration 27 % de la production d'électricité européenne en 2050 et la part de l'hydroélectricité reste assez constante, représentant 14 % au lieu de 13 % dans le scénario EU\_postFuku. Malgré le potentiel d'émissions négatives induites par la BECSC, les centrales électriques équipées de CSC restent majoritairement fossiles en Europe (Figure 39). Le gaz représente respectivement 26 % et 34 % des ressources employées dans les centrales avec CSC en 2050 dans EU\_preFuku et EU\_postFuku, et atteint 46 % dans EU\_NoNuclear. Le charbon est également largement sollicité mais associé à la biomasse dans des centrales à co-combustion IGCC (Integrated gasification combined cycle) avec CSC. Ces dernières représentent respectivement 47 % et 41 % dans les scénarios pre et post-Fukushima et 35 % dans le scénario de sortie progressive du nucléaire en Europe. Il est intéressant de noter que moins l'énergie nucléaire est déployée, plus le gaz est sollicité pour produire de l'électricité.

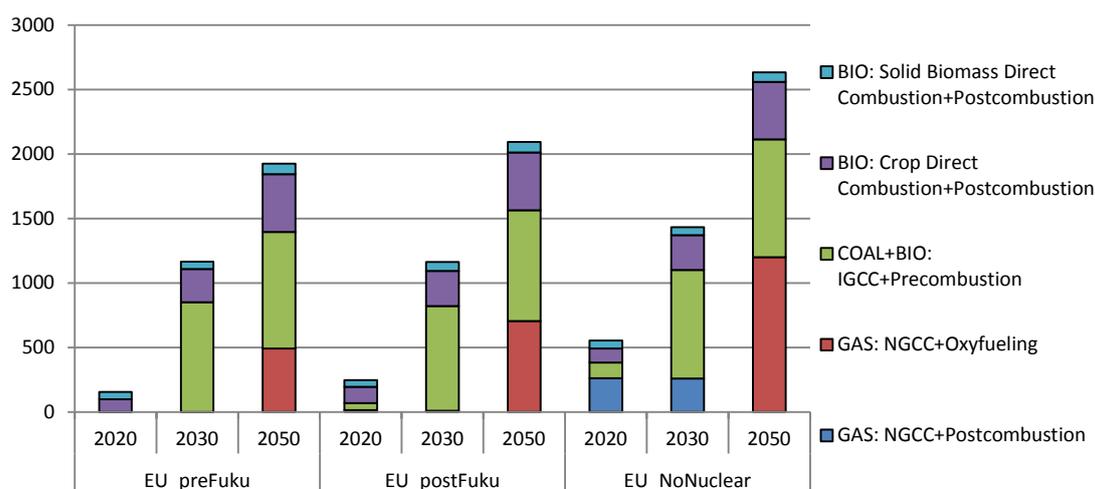


Figure 39: Production électrique européenne des centrales avec CSC (TWh)

Dans EU\_NoNuclear, l'utilisation de la BECSC est limitée par le potentiel de la biomasse en Europe de l'Ouest, soit 13 EJ en 2050. En Europe de l'Est, le potentiel n'est pas saturé; Les choix technologiques proviennent des caractéristiques de coût du système énergétique et de la répartition des contraintes carbone en Europe entre l'Europe de l'Est et l'Europe de l'Ouest. Dans les autres scénarios, l'utilisation de la BECSC reste constante mais son potentiel n'est pas pleinement utilisé. Cela implique qu'à un certain seuil, le coût marginal de la BECSC n'est plus compétitif par rapport à d'autres options bas carbone. Dans EU\_NoCCS où la transition bas-carbone du système énergétique européen doit être réalisée sans recours aux CSC, en 2050, pour atteindre les objectifs climatiques et respecter la politique nucléaire post-Fukushima, l'électricité est principalement produite par les énergies renouvelables. Plus précisément, 68 % de la production d'électricité provient des énergies

renouvelables et 81 % si on tient compte de l'hydroélectricité (11 %) et de la bioélectricité des centrales biomasse (2 %). Avec le relâchement de la contrainte nucléaire dans EU\_NoCCS, les énergies renouvelables représenteraient alors 63 % de la production d'électricité et l'énergie nucléaire atteindrait 23 % (contre 13% dans le scénario BAU). Les énergies renouvelables sont principalement éoliennes. En effet, 50 % de l'électricité européenne renouvelable provient des énergies éoliennes en 2050 dans EU\_NoCCS. Seules les technologies éoliennes onshore (moins coûteuses) sont alors développées sur l'horizon temporel. Les productions électriques géothermique et marémotrice représentent 44 % de la production d'électricité renouvelable. Elles sont principalement développées à partir de 2020 en Europe de l'Ouest. L'électricité solaire thermique ne représente en 2050 que 6 % du mix européen d'électricité renouvelable en raison de son coût plus élevé. En ce sens, les technologies éoliennes, géothermiques et des mers tendent à représenter des substituts technologiques de la CSC dans un contexte de contraintes climatiques et nucléaires. Le débat porte cependant souvent sur la question de savoir si les énergies renouvelables ont le potentiel de combler l'écart d'approvisionnement qui en résulterait et permettrait un système électrique stable, en particulier sans électricité nucléaire (Netzer et Steinhilber, 2011). Les centrales thermiques offrent en effet à ce niveau l'avantage d'un système sûr et fiable, et par là-même donne un atout aux technologies CSC dans un objectif de réduction du carbone. L'intégration massive de renouvelable dans le système électrique implique que celui-ci soit suffisamment flexible pour pouvoir être décarboné suivant une trajectoire long terme réaliste, notamment incluant des centrales électriques complémentaires. Des réseaux de plus en plus sophistiqués seront nécessaires en termes de lignes électriques, de smart grids et de stockage de l'électricité (Drouineau, 2011 ; Bouckaert, 2013 ; Krakowsky, 2016 ; Energy Council, 2012; Förster et al., 2012), ainsi que l'introduction de nouveaux mécanismes de marché. En l'absence de stockage électrique, le recours à l'électricité renouvelable intermittente sera lié à une utilisation supplémentaire - et au moins aussi importante - de l'électricité à base de gaz ou de charbon. Par contre, l'un des avantages de l'intégration à grande échelle des énergies renouvelables est qu'elle permettrait non seulement de poursuivre les objectifs environnementaux, mais aussi ceux de la politique énergétique au sens large comme la sécurité de l'indépendance énergétique et le renforcement de la compétitivité des marchés nationaux.

En outre, la question du coût est déterminante dans TIAM-FR les choix technologiques étant opérés en vue d'une minimisation du coût du système. Pour rappel, les modèles de la famille TIMES sont fondés sur un problème de programmation linéaire dans laquelle l'optimum est calculé en minimisant le coût total actualisé du système énergétique, sur l'horizon temporel en satisfaisant un certain nombre de contraintes. Le coût total du système est constitué quant à lui des coûts d'investissement, des coûts de combustibles (extraction, importation), des coûts annuels fixes d'exploitation et d'entretien ainsi que des coûts d'échanges (importations et exportations). Le coût de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> peut ainsi tout autant être discuté que celui de la sortie du nucléaire en Europe dans le cadre d'une politique de réduction des émissions. Pour se faire, on étudie notamment le coût marginal du carbone correspondant au coût induit par des émissions de CO<sub>2</sub> supplémentaires dans le cas d'un système énergétique contraint par une cible d'atténuation du CO<sub>2</sub>. Selon le système énergétique, et en particulier ses contraintes technologiques, ce coût marginal pourrait être supérieur ou inférieur pour une contrainte de carbone similaire, comme c'est le cas dans la présente étude, où les hypothèses de disponibilité technologique posées dans les scénarios EU\_NoNuclear et EU\_NoCCS rendent plus difficile la transition vers un système bas-carbone. En 2020, les coûts marginaux du carbone varient de

52 €/tCO<sub>2</sub> dans EU\_preFuku à 60 €/tCO<sub>2</sub> dans EU\_NoCCS, et atteignent 56 €/tCO<sub>2</sub> dans EU\_postFuku et EU\_NoNuclear. Le coût marginal du carbone augmente de manière similaire sur la période dans les scénarios pre et post-Fukushima et dans le scénario de sortie du nucléaire, atteignant respectivement 237, 238 et 246 €/tCO<sub>2</sub> en 2050. En revanche, il atteint 495 €/tCO<sub>2</sub> en 2050 dans le cas où les technologies CSC ne sont pas disponibles en Europe, c'est-à-dire dans le scénario EU\_NoCCS. Les différences de coûts surviennent dès 2030, lorsque les investissements ont commencé à satisfaire les contraintes technologiques et climatiques. Pour compenser l'indisponibilité de la CSC (et donc la production d'électricité de source fossile), le développement des énergies renouvelables pèse davantage sur le coût du système énergétique dans un contexte d'objectif bas-carbone. En outre, la contrainte climatique induit une augmentation significative du coût du système énergétique en Europe en 2050 par rapport au BAU, soit une hausse de 13 % de ce dernier dans EU\_preFuku et de 13,6 % dans EU\_postFuku. La sortie progressive du nucléaire en Europe s'ajoute à une politique environnementale rigoureuse en 2050 et induit une augmentation de 14,5 % du coût du système énergétique par rapport au BAU. Par contre, la variation au BAU est de +22,8 % dans le scénario EU\_NoCCS mettant en évidence le rôle clé à jouer de la CSC pour diminuer le coût de mise en œuvre d'objectifs climatiques stricts, les contraintes nucléaires étant mises en place. Pour autant, il est important de considérer le fait que les déterminants de choix du modèle résident dans les coûts technologiques et le respect des contraintes carbone et/ou technologiques posées. La question est donc de savoir si, en Europe, le prix du CO<sub>2</sub> sera suffisamment élevé pour encourager la construction de telles centrales, considérant que le coût de la CSC reste encore incertain (Herzog, 2011)

Ce travail a été réalisé en collaboration avec Olivia Ricci et a fait l'objet d'une publication dans la revue *Energy Economics* en 2013 : Fukushima's impact on the European power sector : the key role of CSC technologies, Volume 39, pp.305-312 (Annexe 3).

### **C. Coût des politiques climatiques**

Ainsi, pour compléter l'analyse des politiques climatiques et leurs impacts sur les systèmes énergétiques, on va s'intéresser à deux types de coûts, le coût de réduction total par région et le coût marginal du carbone. Le coût régional de réduction représente le coût des investissements supplémentaires réalisés en vue d'atteindre la contrainte d'atténuation par rapport au scénario BAU pour chaque région. Le coût marginal du carbone exprime le coût résultant de l'émission d'une tonne de CO<sub>2</sub> additionnelle dans le système énergétique ainsi optimisé au vu de ses contraintes. Deux scénarios climatiques sont ainsi comparés au scénario de référence. Le premier suppose une réduction des émissions mondiales de 50 % en 2050 par rapport à 2000 et concerne toutes les régions. Le second exprime les engagements les plus élevés exprimés dans l'Accord de Copenhague en n'incluant que les objectifs de l'Europe, des Etats-Unis, du Canada, de l'Australie, du Japon, de la Chine et de l'Inde pour 2020 et en y associant des objectifs pour 2050.

- Europe : réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 30 % en 2020 et de 80 % en 2050 par rapport à 1990 ;
- Japon : réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 25 % en 2020 et de 80 % en 2050 par rapport à 1990 ;
- Australie : réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 25 % en 2020 et de 80 % en 2050 par rapport à 2000 ;
- Etats-Unis : réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 17 % en 2020 et de 83 % en 2050 par rapport à 2005 ;

- Canada : réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 17 % en 2020 et de 83 % en 2050 par rapport à 2005 ;
- Chine : réduction de l'intensité carbone de 45 % en 2020 et réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 10 % en 2050 par rapport aux niveaux de 2005 ;
- Inde : réduction de l'intensité carbone de 25 % en 2020 et réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 10 % en 2050 par rapport aux niveaux de 2005.

Table 12 : Coût d'abattement régional du système et coût marginal du carbone

Régions	Coûts de réduction régionaux (M US\$)				Coût marginal du carbone pour les objectifs COP 15 (USD/tCO <sub>2</sub> )	
	Contraintes globales		Objectifs COP 15		2020	2050
	2020	2050	2020	2050		
AFR	3 542	40 412	259	13 585	-	-
AUS	3 700	6 114	2 877	660	34	41
CAN	-886	6 784	727	4 443	12	16
CHI	24 676	639 203	2 353	493 888	-	86
CSA	5 203	39 885	3 523	6 533	-	-
EEU	1 345	35 195	18 616	49 629	58	245
FSU	1 897	75 136	-1 553	4 608	-	-
IND	6 207	147 698	-97	81 294	-	70
JPN	31	24 424	17 842	88 034	92	447
MEA	-462	36 374	3 879	-9 427	-	-
MEX	847	12 518	1 014	2 103	-	-
ODA	657	87 752	-4 112	2 599	-	-
SKO	2 834	30 722	-503	-1 453	-	-
USA	-1 658	181 594	75	251 722	-	183
WEU	3 521	87 561	16 575	226 091	58	245

On notera qu'une valeur négative indique des avantages découlant des exportations.

Dans le scénario exprimant les objectifs nationaux issus de COP 15, le coût total d'atténuation du système, exprimé comme le coût de dépenses additionnelles d'atténuation par rapport au scénario BAU en 2020, est estimé à USD 61 milliards (soit une augmentation de 0,5 % par rapport au BAU). La part la plus importante de ce coût est supportée par les pays industrialisés (92% du coût global). Le coût de l'abattement est relativement élevé pour l'Europe, l'Australie et le Japon (Table 12). Ce sont également les pays dont la contrainte de réduction des émissions est la plus élevée pour 2020. Les coûts marginaux du carbone sont également les plus élevés pour ces régions, ce qui reflète la sévérité de la contrainte (34 USD/tCO<sub>2</sub> pour l'Australie, 58 USD/tCO<sub>2</sub> pour l'Europe et 92 USD/tCO<sub>2</sub> pour le Japon). En 2050, les pays émergents (Inde et Chine) sont davantage contraints par les hypothèses de réduction des émissions que par leurs engagements pour 2020, de sorte que les coûts d'abattement additionnels (par rapport au BAU en 2050) sont plus élevés pour ces régions (environ 600 milliards USD). En 2050, le coût marginal du carbone atteint 447 USD/tCO<sub>2</sub> au Japon, 245 USD/tCO<sub>2</sub> en Europe, 86 USD/tCO<sub>2</sub> en Chine et 75 USD/tCO<sub>2</sub> en Inde. La table suivante montre les coûts de réduction et le coût marginal du carbone (prix du carbone) par région.

Dans le scénario global, le coût de la réduction est supérieur à celui résultant de la mise en œuvre des engagements climatiques issus de la COP 15 pour presque tous les pays en développement et il augmente fortement pour la Chine et l'Inde à partir de 2020. En 2050, 45 % des coûts totaux de réduction sont supportés par la Chine et 10 % par l'Inde. Les pays en développement et les pays industrialisés contribuent au coût global de l'atténuation respectivement à hauteur de 22 % et 23 %. Le

Japon et l'Europe, où les coûts marginaux de réduction du carbone sont élevés, bénéficient de cette politique globale et supportée par l'ensemble des régions du monde. En 2050, les coûts de réduction des émissions dans ces pays dans le scénario global sont inférieurs de 60% à ceux exprimés dans le scénario COP 15. Le coût du carbone dans le scénario global pour toutes les régions est de 11 USD/tCO<sub>2</sub> en 2020, 48 USD/tCO<sub>2</sub> en 2030, 74 USD/tCO<sub>2</sub> en 2040 et de 94 USD/tCO<sub>2</sub> en 2050.

La mise en œuvre d'une politique climatique induit une augmentation du coût total actualisé du système sur la période 2005-2050 par rapport au scénario de référence, celle-ci est de l'ordre de 2 % dans le scénario global et de 1.6 % dans le scénario climatique COP 15. Dans le scénario climatique global, les pays dont le coût actualisé est le moins élevé sont les pays industrialisés, à l'inverse, il apparaît coûteux pour les pays émergents. Ainsi, par exemple, le coût actualisé du système augmente de 6,3 % pour la Chine par rapport au BAU et de 5,8 % pour l'Inde. Afin de conforter ce résultat, nous avons effectué une analyse de sensibilité sur le taux d'actualisation car les coûts à long terme de la réduction des émissions de GES sont fortement influencés par le choix de ce paramètre. Dans un premier temps, on notera que ce taux d'actualisation de 5 % est en adéquation avec celui présent dans la littérature sur le coût des objectifs climatiques, en particulier dans les modèles intégrés (van Vuuren et al. 2010; van Vliet et al. 2012; Krey and Riahi 2009; den Elzen et al., 2011a, 2011b). Pour autant, un taux d'actualisation de 3 % et 7 % a été simulé dans le modèle. Un taux d'actualisation plus élevé donnant une incitation à retarder les mesures d'atténuation, le coût global actualisé additionnel est plus faible avec un taux d'actualisation de 7 % et, à l'inverse, plus élevé avec un taux d'actualisation de 3 %. Au niveau régional, il en résulte que le résultat selon lequel le scénario climatique global est plus coûteux pour les pays émergents que pour les pays industrialisés reste robuste quel que soit l'hypothèse du taux d'actualisation. Ainsi, atteindre un objectif ambitieux en adéquation avec l'objectif ultime de 2°C notamment, implique des coûts particulièrement importants pour la Chine et l'Inde. Ces éléments permettent de donner une autre dimension à la difficulté des négociations internationales et à l'ancrage fort du principe de responsabilités communes et différenciées, également pour la Chine malgré son niveau actuel d'émission. L'objectif de 2°C semble d'autant plus très improbable à moins que des transferts financiers ne soient aussi considérés pour financer ces coûts d'abattement des émissions plus élevés dans les pays émergents.

Ce travail a été réalisé en collaboration avec Olivia Ricci et a fait l'objet d'une publication dans la revue *Economics Bulletin* en 2013 : A cost analysis of the Copenhagen emission reduction pledges, Volume 33, n°1, pp.764-771 (Annexe 4). Une autre analyse des implications économiques des politiques climatiques a porté sur les variations de coûts résultant de choix et disponibilité technologiques. Ce travail a également été réalisé en collaboration avec Olivia Ricci et a fait l'objet d'une publication dans la revue *Energy* en 2014 : Achieving negative emissions with BECCS (bioenergy with carbon capture and storage) in the power sector : new insights from the TIAM-FR (TIMES Integrated Assessment Model France) model, Volume 76, pp.967-975. Cette étude évaluait le possible déploiement de la BECCS dans le secteur électrique dans le contexte de deux scénarios climatiques plus ou moins contraignants. Le premier scénario, RF\_2p6, consiste à limiter le forçage radiatif à 2,6 W/m<sup>2</sup> d'ici 2100. Cet objectif est en adéquation avec l'objectif de l'UNFCCC de limiter la hausse des températures à 2°C. Le second scénario, RF\_3p7, est moins contraignant et vise à limiter

le forçage radiatif à 3,7 W/m<sup>2</sup><sup>28</sup>. Le graphique suivant permet d'apprécier les trajectoires de réduction d'émissions de CO<sub>2</sub> ainsi implémentées ainsi que l'évolution du mix électrique en résultant. La disponibilité de la CSC, de la BECSC et de la co-combustion charbon/biomasse a également été discutée à travers les trois scénarios suivants : RF\_2p6\_NoCCS, où la CSC ne peut pas être développée sur tout l'horizon temporel qui est ici de 2005 à 2100 ; RF\_2p6\_NoBECCS, où la CSC n'est possible que pour les centrales employant des ressources fossiles (co-combustion incluse) ; RF\_2p6\_NoBECCScf où seules les centrales utilisant des ressources exclusivement fossiles peuvent être équipées de technologies CSC.

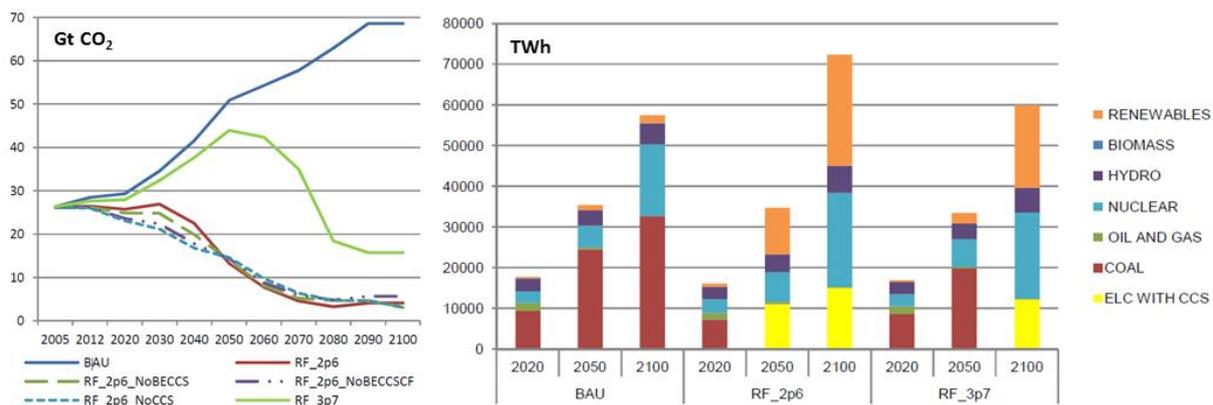


Figure 40 : Emissions mondiales de CO<sub>2</sub> (Gt) et production mondiales d'électricité (TWh)

Ainsi, force est de constater l'évolution de la structure du mix électrique afin de répondre à ces contextes climatiques et technologiques. Le coût marginal du carbone nécessaire pour induire ces changements augmente rapidement dans tous les scénarios (Table 13). L'augmentation la plus rapide se produit dans RF\_2p6\_NoCCS où il passe de 12 USD/tCO<sub>2</sub> en 2005 à 28 USD/tCO<sub>2</sub> en 2020 et autour de 150 USD/tCO<sub>2</sub> en 2050 jusqu'à atteindre 689 USD/tCO<sub>2</sub> en 2100.

Table 13 : Coûts marginaux du carbone suivant les scénarios (USD/tCO<sub>2</sub>)

	RF_2p6	RF_2p6_NoBECCS	RF_2p6_NoBECCScf	RF_2p6_NoBCCS	RF_3p7	RF_3p7_NoBECCS	RF_3p7_NoBECCScf	RF_3p7_NoCCS
2005	7	10	10	12	1	1	1	1
2020	16	22	24	28	2	2	2	3
2040	48	68	75	87	7	7	8	8
2050	85	121	132	153	12	13	13	14
2060	153	216	236	273	21	23	24	26
2080	584	820	897	1 041	75	83	86	92
2100	689	993	1 085	1 244	111	126	130	145

Pour atteindre l'objectif global de 2,6W/m<sup>2</sup>, le coût marginal du carbone est presque deux fois plus élevé en 2100 lorsque la CSC n'est pas disponible. Lorsque la BECSC n'est pas disponible (RF\_2p6\_NoBECCScf), il est environ 1,5 fois plus élevé. Le scénario RF\_2p6 induit une augmentation du coût total actualisé du système sur la période 2005-2100 par rapport au scénario de

<sup>28</sup> A titre de comparaison, une limitation du forçage radiatif à 2,6 W/m<sup>2</sup> équivaut plus ou moins à une limitation de la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> à 377 ppm et des GES à 450ppm<sub>e</sub>. Une limitation du forçage radiatif à 3,7 W/m<sup>2</sup> équivaut à une limitation de la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> à 445 ppm et des GES à 550ppm<sub>e</sub>.

référence de l'ordre de 2,9 % contre 0,5 % dans le scénario RF\_3p7. Dans les deux scénarios, les coûts de réduction des pays émergents sont très élevés par rapport aux autres régions, car le potentiel d'atténuation à des coûts relativement modestes est plus important dans ces dernières. Dans le scénario climatique le plus sévère (RF\_2p6), le coût actualisé du système augmente par rapport au BAU de 12 % pour la Chine, de 8 % pour l'Inde et de seulement 2,5 % pour l'Europe occidentale, de 1,8 % pour les Etats-Unis et 2,4 % pour le Japon. De toute évidence, la possibilité d'utiliser de la BECSC réduit le coût d'atteindre l'objectif exprimé dans RF\_2p6. On peut s'attendre à ce que plus la cible de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> est faible, plus la contribution de la BECSC est importante en réduisant les coûts. Conformément avec la littérature, les résultats de cette analyse montrent que la disponibilité de la BECSC a également un impact sur les trajectoires de réduction des émissions les moins coûteuses vers l'objectif à long terme (Azar et al., 2010 ; Clarke et al., 2009 ; van Vuuren et al., 2010). La disponibilité de la BECSC dans RF\_2p6 retarde la réduction des émissions avant 2030. Le pic d'émissions de CO<sub>2</sub> survient vers 2030, puis une forte réduction se produit entre 2030 et 2050 (toujours dans RF\_2p6). Par contre, lorsque la BECSC n'est pas disponible, les émissions de CO<sub>2</sub> diminuent dès 2010. Inversement, dans le scénario RF\_3p7, le coût total actualisé du système énergétique pour atteindre l'objectif climatique ne varie pas beaucoup, quelle que soit la disponibilité de la technologie CSC. On peut cependant noter un coût supplémentaire plus élevé en cas d'indisponibilité totale de la CSC. Au niveau régional, lorsque la CSC n'est pas disponible et que la politique climatique est ambitieuse (RF\_2p6\_NoCCS), le coût actualisé s'accroît pour toutes les régions. Le scénario RF\_2p6\_NoBECCS affecte par contre principalement les pays qui développent de la BECSC en priorité, comme l'Afrique, l'Australie et le Japon, mais aussi l'Inde qui fait alors fortement dépendre sa production d'électricité de la BECSC. Conformément à la littérature, nos scénarios mettent en évidence que même si un large éventail de technologies d'atténuation s'avère nécessaire pour atteindre des cibles climatiques, la disponibilité de la BECSC permet de réduire le coût de ces objectifs. La trajectoire de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dépend fortement des hypothèses sur les technologies et notamment, si le système peut bénéficier d'émissions négatives, les investissements dans les technologies bas-carbone ont tendance à être moins importants à court terme, et dans ce cas des actions plus agressives tendent à être mises en œuvre plus tard au cours de la période.

### CHAPITRE 3 : MES PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Ces dernières années, je me suis efforcée de creuser la question des politiques climatiques internationales et d'apporter un cadre de compréhension de leurs enjeux en les mettant en perspective avec leurs impacts sur les économies mondiales à travers ceux de leurs systèmes énergétiques. Ces derniers jouent un rôle déterminant car ils constituent non seulement la source du problème de nécessaire stabilisation du climat mais aussi la solution. Le développement des systèmes énergétiques représentent un enjeu majeur pour les sociétés, au regard de leur développement tant économique que social. Depuis la révolution industrielle, les modes de vie des pays développés ont évolué en étant lié à des énergies abordables et accessibles. Ce modèle de société s'est ensuite largement répandu dans le monde et continue à s'étendre aux pays en développement. Pour autant, il repose sur un système énergétique non seulement énergivore mais aussi majoritairement assuré par des combustibles fossiles. Face aux contraintes de changement climatique et à la nécessité d'y faire face, la transition énergétique vers des sociétés décarbonées apparaît comme un enjeu social, économique, environnemental et politique majeur. Le problème central ne constitue alors pas tant une crise de disponibilité de ressources qu'une conséquence de nos modes de consommation énergétique. Le défi climatique auquel nous sommes confrontés se pose également comme un défi de l'innovation et comme une opportunité économique de croissance. Les investissements en jeux pour mener cette transition vers des systèmes bas-carbone sont énormes tout comme l'indispensable réorganisation qui en résultera.

Un des enjeux des négociations climatiques internationales repose sur la contribution des pays en développement à la réduction des émissions de GES, sur la base d'un partage équitable de l'effort d'atténuation, en respectant donc le principe de responsabilités communes et différenciées. A Copenhague, leur participation conditionnait l'engagement des Etats-Unis et à Paris, leur engagement conditionne l'atteinte de l'objectif du 2°C. Reste que les modalités de leur intégration dans des trajectoires d'atténuation ne sont pas encore bien définies, reposant pour une grande part sur la question des transferts technologiques et des financements. A ce niveau, il est dans un premier temps question du respect par les pays industrialisés de leurs promesses de soutien financier, à travers notamment la capitalisation du fonds vert. Dans un second temps, la question sera celle des modalités et mécanismes qui seront mis en œuvre pour assurer un soutien d'envergure permettant une inscription suffisante des pays en développement dans la transition vers une économie bas-carbone. Il ne faut pas oublier que les enjeux énergétiques sont considérables dans les pays en développement, ne serait-ce qu'au regard de l'accès à l'énergie qui reste un facteur déterminant de leur développement. Leur inscription dans des mécanismes d'atténuation d'émissions de GES ne saurait engendrer une limitation à ce niveau.

Les politiques climatiques, quand bien même guidées par des considérations d'ordre politique et économique, ne peuvent se soustraire à une mise en œuvre technologique. L'analyse des engagements climatiques au regard des évolutions engendrées dans les systèmes énergétiques régionaux permet notamment de discuter la plausibilité de l'ambition ainsi recherchée ou attendue. Les choix technologiques en réponse aux contraintes climatiques ou à toute autre politique ou contrainte varient d'une région à une autre. En outre, les choix portés à court terme auront indubitablement des répercussions à long terme du fait notamment de la durée de vie des technologies et des niveaux d'investissements. L'enjeu des économies quant à l'évolution de leur système énergétique ne réside pas tant dans une capacité à répondre aux besoins énergétiques croissants que dans une capacité à

développer le plus vite possible la contribution des énergies « bas carbone » jusqu'à tendre vers un système où elles seront dominantes. Cela passe par la gestion des émissions issues des combustibles fossiles et le déploiement de ressources alternatives. Parmi les solutions plébiscitées, force est de constater que malgré ses controverses, in fine, le CCS rend plausible l'atteinte d'objectifs ambitieux, en particulier quand il est associé à la biomasse, au regard des émissions négatives qu'elle permet. Le rôle futur à jouer de cette option n'est pas encore bien clair en réponse notamment aux signaux de son développement. Je vais continuer à travailler sur ces technologies mais élargir le champ de mes investigations à d'autres solutions bas-carbone.

Il n'est parfois pas facile de prendre de la hauteur par rapport aux résultats du modèle. En travail de fond, le développement et l'entretien du modèle TIAM-FR s'avère nécessaire. Sa pérennité et sa pertinence ne saurait se passer d'une mise à jour régulière des données et des hypothèses qui le constituent. J'ai en tête également quelques développements concernant la représentation régionale. Pour ce qui est de l'analyse des engagements climatiques internationaux, j'envisage de traiter en profondeur les objectifs que se sont fixés les différentes Parties et d'utiliser ce contexte, ce nouveau régime climatique en construction comme terrain d'analyses complémentaires et plus spécifiques. Les points suivants visent à expliciter l'orientation que je souhaiterais faire prendre à ma recherche pour les prochaines années.

## **I. ANALYSE DES ENGAGEMENTS CLIMATIQUES INTERNATIONAUX D'ATTENUATION DES EMISSIONS DE GES**

### **A. Analyse des accords climatiques et extensions aux trajectoires de 1,5°C**

L'Accord de Paris lance un signal fort aux gouvernements nationaux pour les inciter à mettre en œuvre des programmes conséquents d'atténuation des émissions de GES. Je vais dans un premier temps poursuivre le développement des différents scénarios exprimant les engagements des différents pays ou régions. Ces scénarios se concentreront pour les uns sur les cibles de réduction d'émissions de GES et pour les autres sur les mesures spécifiques sur lesquelles certains pays se seraient engagés. Ces analyses pourront bien sûr combiner les deux approches. Un travail exploratoire sera alors mené afin d'étudier différentes hypothèses de cibles renégociées, à la hausse ou non sur mon horizon temporel ; les contributions nationales d'atténuation devant en effet pour rappel être renégociées tous les cinq ans afin de permettre de s'orienter vers une trajectoire décarbonée en adéquation avec l'objectif ultime de limitation de la hausse des températures globales à 2°C.

J'ai en projet également d'analyser des trajectoires de 2°C mais aussi de 1,5°C tout en conservant la question de la répartition des efforts entre les pays face au fardeau climatique. Le principe de responsabilités communes mais différenciées sera une considération centrale dans cette analyse, tout comme les changements technologiques des systèmes énergétiques et les évolutions des différentes ressources.

Un travail plus approfondi sera réalisé sur l'analyse des résultats et des implications. Comme précisé précédemment, il est parfois difficile de prendre de la hauteur et du recul sur les résultats de nos modèles, mais c'est un travail nécessaire que je ne pense pas avoir suffisamment réalisé dans mes analyses précédentes. J'ai exploré plus précisément d'une part le rôle de la capture et séquestration du

carbone en termes de solution technologique au défi climatique et d'autre part celui des pays en développement en ce qui concerne leur contribution d'atténuation des émissions de GES. Tous deux viennent « au secours du climat » comme je l'ai mentionné dans le titre de ce manuscrit, au sens où d'un côté la CSC rend plausible les cibles ambitieuses, mais nécessaires, de réduction des émissions de GES et de l'autre côté, définitivement, l'atteinte de ces cibles ne seraient pas possibles sans la contribution des pays développement. Reste à davantage en discuter les contours : approfondir l'analyse du développement de l'option CSC notamment avec une veille technologique plus poussée et s'inscrivant dans le temps et, concernant les pays en développement, étudier plus avant les mécanismes de financements et de transferts technologiques, tout comme les mesures et les actions qui sont mises en place. Il pourrait alors être pertinent de combiner une analyse par engagements nationaux d'atténuation et une analyse par les projets et les actions mises en place pour réduire les émissions de GES. Il conviendrait alors d'en comptabiliser les impacts, certains étant inscrits dans les Mesures d'atténuation appropriées au niveau national (MAANs ou plus couramment NAMAs en anglais)<sup>29</sup>. Le Registre des NAMAs de l'UNFCCC accueille des NAMAs depuis 2013 et est issu des Accords de Cancun de 2010 qui ont instauré des progrès significatifs consistant principalement en la création formelle d'institutions, tels que le Fonds vert pour le climat, le Comité pour l'adaptation et le Centre de technologie pour le climat. D'autres avancées incluent la mise en place d'un registre des NAMAs afin de les optimiser. Il pourrait devenir un instrument pertinent de mise en œuvre de l'Accord de Paris. Il en est de même du Plan d'Actions Lima-Paris<sup>30</sup> qui est une initiative menée par la France, le Pérou, le Secrétaire général des Nations Unies et le secrétariat de l'UNFCCC à l'issue de la COP 20 de Lima au Pérou avec comme objectif est de promouvoir, d'ici la COP 21, les engagements et les partenariats des villes, régions, entreprises et organisations de la société civile, souvent avec les gouvernements, qui réduisent les émissions de gaz à effet de serre et renforcent la résilience face aux changements climatiques. Il vise à démontrer que la transition vers une société et une économie sobre en carbone et résiliente au changement climatique est à la fois urgente et possible – politiquement, économiquement et technologiquement. Il va de pair avec la plateforme NAZCA (Non-State Actor Zone for Climate Action)<sup>31</sup> lancée à Lima également et qui inscrit les engagements à l'action par les entreprises, les villes, les régions infranationales, et les investisseurs dans la lutte contre le changement climatique. A ce jour, elle affiche déjà plus de 12 500 engagements et contribue à l'aboutissement avec succès d'un des objectifs de la COP 22 de Marrakech qui était de « consolider la mobilisation des acteurs non étatiques et des gouvernements dans le cadre de l'« Agenda global d'action pour le climat », afin de garantir sa pérennité à travers des annonces d'actions et d'initiatives concrètes ». La feuille de route de la COP 22 était en effet placée sous le signe de l'action et son bilan reste mitigé la COP 22 n'étant pas parvenue à prendre le pas de l'urgence climatique. En effet, en dépit de l'importante mobilisation des gouvernements ayant permis la mise en vigueur de l'Accord de Paris moins d'un an après son adoption (chose inédite pour un traité international des Nations Unies) et celles des acteurs non-étatiques comme mentionné plus haut, l'objectif de « mettre en place une feuille

---

<sup>29</sup> Les MAAN se réfèrent à toute action qui réduit les émissions dans les pays en développement et est préparée dans le cadre d'une initiative gouvernementale nationale. Elles peuvent consister en politiques visant à un changement transformationnel au sein d'un secteur économique, ou en mesures recoupant plusieurs secteurs pour une orientation nationale plus large. Étant donné que la publication des informations relatives aux MAAN est volontaire et à la discrétion des gouvernements et de ceux qui parrainent les projets, il est cependant difficile d'effectuer une évaluation complète de ces documents.

<sup>30</sup> Pour en savoir plus sur le Plan d'actions Lima-Paris (LPAA en anglais) : <http://newsroom.unfccc.int/lpaa-fr/>

<sup>31</sup> Pour en savoir plus sur la plateforme NAZCA : <http://climateaction.unfccc.int/register.aspx>

de route prévisible et concrète en vue de mobiliser 100 milliards de dollars par an d'ici 2020 ainsi que des fonds pour le financement des projets est un échec. Les questions touchant à leur provenance (fonds publics, privés) et à leur utilisation restent encore sans réponse. Ainsi, la COP 22 est parvenu à maintenir la mobilisation de tous les acteurs, ce qui avait permis d'aboutir à l'Accord historique de Paris, mais l'accélération attendue de sa mise en œuvre au regard des défis énormes qui restent à relever pour assurer une transition vers un monde bas-carbone ne fut pas au rendez-vous. Pour en revenir à la plateforme NAZCA, elle doit par ailleurs être consolidée mais rien n'en précise encore la forme, la nature des engagements (car pour l'instant il n'y a pas de critère de sélection ou de présentation et reporting des initiatives affichées) ni comment ils seront ancrés dans l'Accord de Paris. Cette question de l'analyse des mesures de lutte contre le changement climatique en complément des trajectoires d'atténuation des émissions des GES engagées dans les INDCs est à discuter dans tous les cas.

## **B. Enquête Actions Climat**

Afin de disposer d'éléments supplémentaires d'analyse sur le nouveau régime climatique, je vais réaliser au moment des Conférences des Parties, une série d'enquêtes portant sur un focus spécifique chaque année. Pour mener à bien ce projet, j'ai constitué un petit groupe de chercheurs composé d'Ankinée Kirakosian, actuellement en post-doctorat au CMA, et de Samira Demaria, Maître de Conférences en Sciences de Gestion à l'Université de Nice Sophia Antipolis. Leurs compétences en montage d'enquêtes et d'analyse des données, notamment économétrique, constitueront un atout dans ce projet. Une première enquête a été lancée en 2016 pendant la COP 22 de Marrakech. Elle fut destinée, dans un premier temps, aux personnes disposant d'une accréditation des Nations Unies pour assister aux Conférences des Parties. Un panel de plusieurs milliers de personnes disposant d'accréditation a été constitué, le questionnaire leur a été adressé et, à ce jour, nous avons reçu 476 retours de questionnaire. Cette première enquête a consisté en une sorte d'introduction à cette analyse annuelle. Elle a principalement porté sur :

- Appréciation du défi climatique
  - Ampleur du problème
  - Disponibilité des informations quant aux causes et conséquences, aux actions que les individus, les entreprises ou les gouvernements peuvent prendre, les opportunités émanant de la lutte contre le changement climatique
- Appréciation de l'Accord de Paris
  - Niveau de succès et d'ambition
  - Niveau de négociation des intérêts des différents pays
- Appréciation de l'effort à mettre en œuvre
  - Suffisance du niveau d'effort des pays
  - Principale responsabilité des actions entre les individus, les entreprises, les gouvernements, les villes, les ONG
  - Meilleure capacité à mettre en œuvre des solutions de lutte contre le changement climatique entre les individus, les entreprises, les gouvernements, les villes, les ONG
  - Priorité d'action entre les modes de vie, les modes de production, les soutiens financiers, les responsabilités des gouvernements

- Priorité d'action entre l'accroissement de l'ambition, la mise en œuvre d'action et la fourniture de soutiens
- Appréciation de la réponse technologique
  - Disponibilité des solutions
  - Principaux besoins pour les mettre en œuvre ou pour les développer
- Appréciation du soutien financier
  - Suffisance des fonds investis
- Appréciation du niveau de contribution attendu des pays suivant leur niveau de développement
  - Dans la mise en œuvre d'actions
  - Dans l'apport de soutiens financiers
  - Dans l'apport de soutiens technologiques

Nous testerons dans un second temps la diffusion de cette enquête au plus grand nombre possible de personnes non-accréditées afin de récolter leurs appréciations de ces questions. L'objectif est de déterminer si les réponses ont tendance à être partagées par tous ou s'il y a une spécificité chez celles qui sont « plus sensibilisées » de par leur participation aux Conférences des Parties. Chaque année, nous proposerons un nouveau questionnaire qui pourra être orientée vers une actualité particulière de l'année écoulée, vers les avancées réalisées dans la mise en œuvre de l'Accord de Paris, etc. Cette étude est destinée à faire l'objet de publications dans des revues internationales et à être communiquée pendant les Conférences des Parties.

### **C. Modification de la fonction objectif de TIAM-FR**

Les trajectoires de réduction des émissions de GES que j'analyse résultent de l'implémentation de contraintes carbone dans le modèle dont la fonction objectif à minimiser est le coût total actualisé du système énergétique. Ces contraintes carbone peuvent prendre des formes variées que ce soit une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> ou de GES ou alors, grâce au module climatique intégré dans le modèle, une limitation de la hausse des températures imposée par le modélisateur, tout comme une limitation du forçage radiatif ou de la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> ou du CO<sub>2</sub>équivalent. Je souhaiterai étudier les trajectoires d'émissions qui résulteraient d'une modification de ma fonction objectif à savoir la minimisation des émissions de CO<sub>2</sub>. Autrement dit, le modèle ne minimiserait plus le coût total du système sous contrainte de satisfaction des demandes et sous contraintes éventuelles environnementales ou technologiques, mais minimiserait le niveau d'émissions de CO<sub>2</sub> sur la période étudiée. Des contraintes technologiques pourraient également être ajoutées pour disposer de scénarios contrastés. Les trajectoires d'émissions de CO<sub>2</sub> ne seraient ainsi plus imposées par le modélisateur comme une politique climatique, mais seraient la résultante de l'implémentation de différentes contraintes technologiques ou de ressources, comme la mise en œuvre d'actions. Ce travail pourrait être réalisé dans le cadre d'un stage en optimisation.

## **II. ANALYSE DES DEFIS LIES AU DEVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE**

### **A. Potentiels d'une biomasse durable, clé de voûte du développement de la filière BCSC ?**

Dans un premier temps, je vais tirer parti des développements qui ont été apportés dans le modèle TIAM-FR par Seungwoo Kang dans le cadre du travail de thèse que je supervise. Comme présenté dans la seconde partie, sa recherche porte sur l'implémentation des échanges des ressources biomasses dans TIAM-FR. Pour se faire, un gros travail de développement a été réalisé sur la représentation même des ressources et sur leur potentiel qui a été endogénéisé dans le modèle suivant l'évolution des besoins en bioénergies mais aussi et surtout en tenant compte de considérations liées à l'usage des sols, leur surface, leur rendement et leurs utilisations à des fins alimentaires, de construction, etc. Dans la littérature en effet, le potentiel de biomasse varie considérablement suivant les différentes hypothèses sur l'utilisation des terres, le développement des rendements, la consommation alimentaire et d'autres critères de durabilité, comme la pénurie d'eau et la perte de biodiversité (van Vuuren et al., 2009 ; IPCC, 2011). Ce travail permet ainsi d'affiner la prise en compte de la biomasse dans le modèle, ce qui peut s'avérer déterminant au regard de la place occupée par la capture et la séquestration de carbone associée à la biomasse (BECSC) dans les scénarios climatiques.

En effet, en prospective long terme, il est important d'examiner avec précaution les résultats des modèles. Après avoir étudié les potentiels de stockage du carbone, il était important d'approfondir la discussion sur les potentiels des ressources biomasses qui sont escomptés en cas d'investissements dans la BECS. Les incertitudes concernent notamment le potentiel de la biomasse durable dans le système énergétique et le développement du commerce international de cette ressource qui pourrait en résulter. Le modèle considère uniquement les potentiels exogènes par région. Les hypothèses que nous avons formulées sont plutôt conservatrices (234 EJ en 2050), mais elles ne permettent pas d'examiner l'impact environnemental de la production de biomasse en termes d'aménagement du territoire. En outre, le commerce international de la biomasse pourrait jouer un rôle central dans le développement régional des technologies de BECS. Il est possible que les pays qui pourraient devenir des producteurs importants de biomasse ne soient pas les mêmes que les pays qui pourraient devenir des utilisateurs importants de la biomasse. Des études ont montré que le plus important potentiel de production de biomasse surviendra dans des régions où les conditions climatiques sont favorables et où les ressources en terres sont abondantes, comme l'Amérique latine et l'Amérique du Nord, l'Asie centrale, la Chine et l'Afrique subsaharienne. Par contre, les principales demandes viendraient des pays de l'OCDE et de l'Asie du Sud-Est (Dornburg, V., et al., 2008 ; Haberl, H., et al., 2010). La version actuelle de TIAM-FR ne peut pas prendre en considération ces éléments dans la mesure où la biomasse n'est pas échangée entre les régions. Introduire un marché international de la biomasse dans le modèle est donc une question clé pour les analyses en cours, et notamment celles traitant de la BECS.

### **B. Et en dehors du secteur électrique et de la CCS ?**

Même si je compte approfondir de prime abord l'analyse du secteur électrique dont la décarbonisation constitue un enjeu crucial face au problème de réchauffement climatique, la représentation plus fine des bioénergies permettra également de développer une réflexion sur le secteur du transport (voire du

secteur résidentiel dont l'évolution des usages peuvent impacter le développement de la ressource biomasse ou inversement). Plusieurs pays ou régions ont en effet mis en place des politiques touchant au recours des biocarburants ; cela participe également de la lutte contre le changement climatique et il est nécessaire d'en tenir compte dans l'évaluation de la participation régionale au défi climatique ou plus généralement, dans l'analyse des politiques mises en œuvre. L'analyse d'un secteur électrique décarboné ne saurait par ailleurs être isolée d'une réflexion sur le rôle des énergies renouvelables dans les différentes régions. La question de la production d'électricité décentralisée y aura toute sa place, notamment dans les pays en développement. Le devenir de ce modèle énergétique inversé par rapport aux modèles centralisés qui font référence dans les pays industrialisés est encore incertain mais pourrait survenir comme une révolution, technologique, économique et sociale, dans les pays en développement et notamment en Afrique où l'accès à l'électricité est un réel challenge, le taux d'électrification en Afrique subsaharienne avoisinant les 35 % en 2012, contre 23% en 1990 (World DataBank). Pour traiter cette question spécifique, j'ambitionne le développement d'un nouveau modèle TIMES dédié à l'Afrique. La question de la représentation régionale des systèmes énergétiques fait également parti des projets de recherche futurs que je compte mener.

Un autre secteur apparaît important dans les INDCS mais aussi dans les NAMAs et consiste au secteur AFAT, autrement dit l'agriculture, l'exploitation forestière et les autres utilisations des terres. Les émissions de GES issues du secteur AFAT représentent 24 % des émissions totales (IPPC, 2014) faisant de ce secteur celui produisant le plus d'émissions de GES après le secteur de l'énergie. Un point important à noter est la particularité de ce secteur qui traite des émissions et des absorptions de GES anthropiques, définies par « toutes les émissions et absorptions se produisant sur les « terres gérées » et qui sont associées à l'utilisation des terres, incluant l'agriculture et l'élevage. Les terres gérées sont des terres où ont été réalisées des interventions et pratiques humaines afin de permettre leurs fonctions productives, écologiques ou sociales (IPCC, 2006). La FAO<sup>32</sup> recense que plus de 90 % des Parties ont identifiés des mesures d'atténuation dans ce secteur : l'agriculture est visé par 135 pays, la foresterie et le changement d'utilisation des terres par 143 pays et enfin les pêches et l'aquaculture par 8 pays. Les actions incluent l'afforestation et la reforestation, la prévention de la déforestation et de la dégradation, la gestion de la forêt, l'agroforesterie, et meilleure gestion de l'élevage, des sols, et de la culture du riz. Les objectifs de réduction des émissions de GES ne sont cependant pas chiffrés - en dehors de 12 Parties les mentionnant pour la foresterie et le changement d'utilisation des terres et 10 parties pour l'agriculture – et des incertitudes dans les données et les méthodes d'estimation demeurent encore. Pour autant, diverses options pour l'atténuation dans ce secteur ont été identifiées comme :

- Pour la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>
  - La diminution de la déforestation et de la dégradation des forêts

---

<sup>32</sup> Informations relevées dans le document outil d'apprentissage sur les NAMAs dans le secteur AFAT rédigé par la FAO à l'occasion de l'Atelier sur la « Contribution des NAMAs à la mise en œuvre des INDCs », 12-13 avril 2016, Abidjan, Côte d'Ivoire, organisé par l'UNFCCC et le partenariat international sur l'atténuation et le MRV. MRV désigne des émissions « Mesurables, Rapportables, Vérifiables » suivant le processus qualité à respecter dans les engagements internationaux. Quant au partenariat international sur l'atténuation et le MRV, il a été lancé lors du dialogue de Petersberg sur le climat organisé en 2010 à Bonn par l'Afrique du Sud, la Corée du Sud et l'Allemagne afin d'encourager les pays partenaires à renforcer l'ambition d'atténuation des GES. Le Partenariat facilite ainsi l'échange des meilleures pratiques entre les négociateurs sur le climat, les décideurs et les professionnels de plus de 90 pays en voie de développement, émergents et développés.

- L'adoption croissante de pratiques agricoles améliorées (réduction du travail du sol, gestion intégrée des nutriments, irrigation plus efficient, plus longues rotations)
- Pour la réduction des émissions de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O
  - Amélioration de la production animale et la gestion du fumier de l'élevage
  - Systèmes d'irrigation plus efficients pour le riz, amélioration de la gestion des nutriments
- Pour l'augmentation de la séquestration de carbone
  - Adoption de pratiques conservatrices de l'agriculture
  - Amélioration de la gestion forestière, reboisement, agroforesterie, amélioration de la gestion des prairies, restauration des terres dégradées
- Pour la hausse de l'efficacité productive
  - Pratiques améliorées d'irrigation et d'après récoltes
  - Amélioration des variétés agricoles et de la gestion de l'élevage
  - Réduction des pertes et des gaspillages alimentaires.

Ainsi, le potentiel d'atténuation dans le secteur AFAT est reconnu dans les INDCs et les NAMAs apparaissent comme un instrument de support à la mise en œuvre de ces INDCS, même si reste bien sûr la question du financement de ces options. Les enjeux d'évolution de ce secteur ne sont pas à négliger au vu du contexte climatique et des politiques d'atténuation<sup>33</sup> des émissions de GES. Il serait ainsi intéressant de les prendre en compte dans le modèle TIAM-FR, ce qui n'est pas le cas, même si quelques éléments sont représentés a minima pour ainsi dire, comme l'afforestation et maintenant l'usage des terres pour la gestion de la biomasse. La prise en compte de ces questions dans nos analyses prospectives pourrait faire l'objet d'un travail de thèse. Il pourrait viser la construction d'un module dédié à ces questions. L'éventuel couplage avec le modèle TIAM-FR serait à discuter au regard de la réserve de la taille du modèle qui en résulterait et donc de l'accroissement important des temps de calcul, l'objectif n'étant pas de construire des super-modèles dont les résultats deviendraient par ailleurs de plus en plus difficiles à interpréter.

Ce travail permettrait par ailleurs de rattacher cette question à celle de l'eau qui a déjà été exploré au regard des interconnexions de l'eau et des systèmes énergétiques, l'énergie étant nécessaire à la fourniture en eau pendant que l'eau est essentiel pour produire de l'énergie. A cet égard, la question des besoins en eaux a d'ores et déjà été intégrée dans le modèle TIAM-FR par Stéphanie Bouckaert, dans le cadre de son stage de Mastère Spécialisé OSE que j'ai co-encadré en 2009-2010. Un important travail avait alors été réalisé et a consisté en l'implémentation d'empreinte eau dans les technologies, en termes de prélèvement et de consommation de différentes catégories d'eau. Différents types d'eau ont alors en effet été identifiés pour les systèmes de refroidissement (en boucle ouverte) comme l'eau saumâtre, l'eau souterraine ou encore l'eau salée, tandis que pour tous les autres procédés, seule l'eau douce a été considérée. J'ai par la suite raffiné la représentation des besoins en eau afin de les obtenir pour chaque type de centrales équipées de technologies de capture de CO<sub>2</sub> me permettant de faire des études d'impact en eau des différentes options technologiques bas-carbone. D'autres développements vont prochainement être menés par Seungwoo Kang dans le cadre de sa thèse en réponse à la

---

<sup>33</sup> Je n'oublie bien évidemment pas le rôle crucial de ce secteur dans la problématique de l'adaptation mais je ne traite pas du tout ce cet aspect à ce jour et n'envisage pas encore de me lancer dans cet autre grand chantier. Je me concentre donc sur la question de l'atténuation même si des liens sont tenus entre les deux notamment dans le cadre du secteur AFAT.

transformation de la filière biomasse qu'il a réalisée. Pourront s'en suivre là-encore une série d'études d'impact en eau des différentes trajectoires bas-carbone étudiées.

Les projets de développement du modèle TIAM-FR au travers la représentation technologique des systèmes énergétiques ne manquent pas. On pourrait également citer l'intégration des nouveaux biocarburants comme les micro-algues qui sont sujets à des recherches croissantes. L'intérêt y est d'ailleurs double car ces biocarburants pourraient entrer dans une filière de valorisation industrielle du carbone où ce dernier serait alors une matière première. Cette question des voies de valorisation industrielle du CO<sub>2</sub> constitue elle aussi une éventuelle prochaine étape de développement du modèle sachant que dans ce cadre, je pourrais m'appuyer sur un travail réalisé par le centre de recherche néerlandais ECN et implémenté dans le modèle ETSAP-TIAM dans le cadre du consortium international qui a été créé autour de ce modèle. Reste néanmoins la question du temps pour mener à bien tous ces projets.

### **III. ANALYSE DE DEFIS REGIONAUX**

#### **A. Accès à l'énergie en Afrique**

Concernant l'Afrique, un premier travail a déjà été fait dans TIAM-FR afin d'améliorer la représentation des disparités régionales au sein du secteur électrique africain. Pour rappel, il consistait en une sous-régionalisation du secteur électrique considérant l'Afrique du Nord, l'Afrique du Sud et l'Afrique sub-saharienne. Pour autant, il serait intéressant de développer un modèle électrique africain spécifique suivant une désagrégation plus fine afin d'étudier notamment le développement de l'électrification décentralisée basées sur les énergies renouvelables. Ce développement est particulièrement attendu dans les zones rurales où les taux d'électrification sont encore plus faibles (autour de 17 % en moyenne et même inférieure à 5 % dans plus d'une vingtaine de pays de cette région) et où les solutions énergétiques déployées sont souvent coûteuses, chronophages, précaires et surtout nocives pour la santé. Je ne parle pas des impacts négatifs sur l'environnement. L'électricité produite est la plupart du temps chère alors même que les ressources des ménages sont faibles. Ce projet de développement de modèle est envisagé en collaboration avec Edi Assoumou, chargé de recherche au CMA, qui a développé le modèle TIMES-France. Nous n'avons pas encore déterminé le cadre dans lequel pourrait être menée cette recherche, nous allons faire un état des lieux d'éventuels appels à projets auxquels nous pourrions soumettre cette proposition, envisager la supervision d'un stage de Mastère Spécialisé en Optimisation des Systèmes Energétiques qui est dirigé au CMA ou le mettre en œuvre nous-même en fonction du temps que nous pourrions y consacrer au vu des autres projets que nous menons parallèlement.

#### **B. Le marché carbone en Chine**

La Chine est également une région que je souhaiterais développer. Le cadre général de cette recherche serait alors l'évaluation prospective des défis du système énergétique chinois d'ici 2050. Cette question serait considérée sous l'angle des engagements en matière de lutte contre changement climatique que la Chine a pris dans le cadre de l'Accord de Paris et donc précisément sous l'angle des choix technologiques permettant une réduction des émissions de gaz à effet de serre. En d'autres termes, comment la Chine peut poursuivre sa modernisation, avec un important projet d'industrialisation et

d'urbanisation commencé depuis trente ans avec des taux de croissance élevés, tout en s'engageant sur une trajectoire bas-carbone dans le futur ? Cette analyse serait menée par l'élaboration d'un modèle chinois TIMES qui serait développé en prenant en considération une possible connexion avec le modèle TIAM-FR et une étude d'impact du nouveau marché du carbone et des technologies bas-carbone. Après les systèmes adoptés en Europe et en Californie et suite à la mise en place de sept marchés régionaux pilotes en Chine depuis 2011, la Chine s'apprête à lancer en 2017 son marché du carbone. Il devrait couvrir quatre gigatonnes de GES, soit près de la moitié des émissions, et près de 10 000 entreprises dès son lancement. Sa taille devrait s'accroître après 2020. Selon Jiang Zhaoli, vice-directeur du Bureau du climat à l'agence de planification chinoise, la Commission nationale du développement et de la réforme (CNDR), le marché du carbone en Chine sera le plus grand au monde et ses ambitions seront plus élevées que celles du gouvernement « pour s'assurer qu'il ait un effet suffisant »<sup>34</sup>. Ce travail de recherche est destiné à faire l'objet d'une thèse. Dans un premier temps, j'ai soumis ce sujet au Programme CSC-ParisTech PhD dans le cadre de sa campagne de recrutement de doctorants 2016-2017. Ce programme a été mis en place en 2013 dans le cadre d'un programme de coopération internationale, notamment avec la Chine, en collaboration avec l'Université Jiao Tong de Shanghai, le financement reposant quant à lui sur une collaboration avec le China Scholarship Council. La date limite de candidature est fixée au 15 décembre 2016, les retours nous seront adressés au 15 janvier 2017.

### **C. Le secteur des transports au Brésil**

En matière d'analyse prospective régionale, j'ai co-supervisé la thèse de Sébastien Postic, dont la soutenance a eu lieu en décembre 2015 sur un travail de modélisation pour l'Amérique Latine le conduisant à développer un modèle prospectif dédié à cette région, TIMES-ALyC, et avec lequel il a mené une application aux négociations climatiques internationales. Ce modèle a été développé en considérant la possibilité d'un couplage avec TIAM-FR. J'ai déjà utilisé TIMES-ALyC pour affiner la prise en compte des INDCs de l'Amérique Latine dans TIAM-FR mais une réflexion est à mener sur les connexions à établir entre ces deux modèles au regard d'une autre perspective consistant en l'intégration d'une seizième région dans TIAM-FR, le Brésil. En effet, le poids du Brésil - un des BRICS avec l'Afrique du Sud, la Chine, l'Inde et la Russie - dans la géopolitique et l'économie mondiale, et surtout sa place dans la production des biocarburants rendent intéressante son intégration dans le modèle TIAM-FR, d'autant plus si on considère les développements réalisés dans la représentation de la bioénergie et des échanges commerciaux inhérents à cette ressource. Malgré la crise que traverse le pays, les problèmes internes et une situation économique difficile, son implication dans les BRICS et les investissements russes et chinois annoncent la mise en œuvre de grands projets de développement, pour beaucoup en lien avec le domaine énergétique ; des changements structurels étant en tout état de cause nécessaires dans le pays.

Dans cette optique et avant le développement de TIMES-ALyC, j'avais déjà initié une collaboration avec un chercheur en économie brésilien de l'Université Fédérale de Rio de Janeiro, dans le département Energy Planning Engineering spécialisé dans les questions énergétiques. Cette collaboration a pris la forme en 2012 d'une demande de subventions via le réseau « Science sans frontière » et devait alors permettre le financement d'une thèse et d'un séjour de quelques mois au

---

<sup>34</sup><http://www.capital.fr/bourse/actualites/le-marche-du-carbone-en-chine-couvrira-la-moitie-des-emissions-1090553>

Brésil par un post-doctorant qui aurait éventuellement pu être embauché dans ce contexte afin de travailler au développement du système énergétique brésilien. Le doctorant, qui devait passer un an au CMA devait alors travailler plus spécifiquement sur l'analyse de la construction de centrales hydroélectriques binationales. Ce projet n'a malheureusement pas abouti. Nous avons essayé de soumettre un projet en 2013 dans le cadre de MathAmSud avec plus ou moins le même objectif mais cela n'a pas été concluant non plus. La représentation du pays ayant déjà été intégrée dans le modèle TIMES-ALyC, un projet de stage pourrait être monté à cette fin voire un sujet de thèse en l'associant à une problématique plus large comme celle des échanges mondiaux des ressources énergétiques par exemple ou encore celle de la déforestation qui constitue un important fléau climatique sur lequel j'ai prévu également de me pencher. L'étude du secteur des transports au Brésil constitue également un sujet d'exploration intéressant. Non seulement, il permettrait de travailler sur la représentation de ce secteur dans le modèle TIAM-FR mais aussi il s'insère parfaitement dans la problématique plus large des bioénergies au vu de son exploitation de la biomasse et de l'importante contribution de l'éthanol à la fourniture d'énergie dans le pays. Leader dans l'exploitation de la canne à sucre mais valorisant peu ses coproduits comme la bagasse, le Brésil dispose donc d'un potentiel intéressant pour produire de l'électricité.

#### **D. Focus Europe**

En matière d'analyse régionale, un autre chantier que je voudrais entreprendre est celui du modèle européen. Le CMA dispose déjà du modèle PET- panEuropean TIMES model - mais il demande à être recalibré et simplifié. Ce modèle TIMES-EU permettrait notamment d'analyser la contribution nationale des différents pays européens à la lutte contre le réchauffement climatique. Dans le cadre de l'UNFCCC, les négociations climatiques internationales tout comme les engagements sont en effet opérés au nom de l'Union européenne. Il serait également intéressant de mettre en perspective le système d'échange de quotas d'émissions européen avec le marché carbone chinois. L'ampleur du travail à accomplir pour développer le modèle TIMES-EU nécessite par contre qu'il soit réalisé dans le cadre d'une thèse.

**PARTIE II :**  
**PRODUCTION SCIENTIFIQUE ET STRATEGIE DE RECHERCHE**

---

## CHAPITRE 4 : PRODUCTION SCIENTIFIQUE

Table 14 : Synthèse des publications et communications

<b>Publications / Communications</b>	<b>Nombre</b>
Articles dans des revues à comité de lecture répertoriés à HCERES	4
Articles dans des revues à comité de lecture non répertoriés à l'HCERES	8
Ouvrages et chapitres d'ouvrages	4
Conférences internationales avec comité de sélection et Actes	26
Conférences nationales avec comité de sélection et Actes (synthèse publiée)	1
Conférences invitées	5
Conférences internationales avec comité de sélection	17
Conférences internationales sans comité de sélection	20
Conférences nationales sans comité de sélection	7
Working papers	11
Rapports de projet	6
Autres publications : Traductions publiées dans des revues	3
Autres publications : Posters	4
Autres publications : Newsletters	14
Autres publications : Articles soumis en cours d'évaluation	3
Séminaires internes	5

Table 15 : Référencement des revues dans lesquelles les articles ont été publiés :

<b>Revues</b>	<b>Articles publiés</b>	<b>ISSN</b>	<b>Rang HCERES</b>	<b>Impact Factor</b>	<b>Impact Factor (à 5 ans)</b>	<b>SNIP</b>
Energy Economics	1	0140-9883	A	2.862	3.574	1.851
Energy Policy	2	0301-4215	A	3.045	3.701	1.653
Economics Bulletin	1	1545-2921	B			0.308
Applied Energy	2	0306-2619		5.746	6.222	2.439
Energy	2	0360-5442		4.292	4.810	1.898
Energy Strategy Review	1	2211-467X				0.982
International Journal of Oil, Gas and Coal Technology	1	1753-3317		0.654		0.612
Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics	1	1690-4524		0.872		
Energy Procedia	1	1876-6102				

## **A. ARTICLES DANS DES REVUES INTERNATIONALES AVEC COMITE DE LECTURE REPERTORIEES A L'HCERES**

POSTIC Sébastien, SELOSSE Sandrine and MAÏZI Nadia (2017), Energy contribution to Latin American NDCs: Analyzing sub-regional trends with a TIMES model, *Energy Policy*, Volume 101, February, pp. 170-184, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.023>

SELOSSE Sandrine, RICCI Olivia and MAÏZI Nadia (2013), Fukushima's impact on the European power sector: The key role of CCS technology, *Energy Economics*, Volume 39, September, pages 305-312, doi:10.1016/j.eneco.2013.05.013

RICCI Olivia and SELOSSE Sandrine (2013), Regional impacts of post Copenhagen emission reduction pledges: prospective analysis with TIAM-FR, *Economics Bulletin*, Vol.33, N°1, pp. 764-777

RICCI Olivia and SELOSSE Sandrine (2013), Global and regional potential for bioelectricity with carbon capture and storage, *Energy Policy*, 52, 689-698. doi:10.1016/j.enpol.2012.10.027

## **B. ARTICLES DANS DES REVUES INTERNATIONALES AVEC COMITE DE LECTURE NON REPERTORIEES A L'HCERES**

KANG Seungwoo, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2017), Is GHG mitigation policy enough to develop bioenergy in Asia: a long-term analysis with TIAM-FR, *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology (IJOGCT)*, Special Issue on: IBSCE 2015 Bioenergy and Biofuels in Asia and Europe, 14 (1/2), pp.5-31. [10.1504/IJOGCT.2017.10002111](https://doi.org/10.1504/IJOGCT.2017.10002111). [hal-01419991](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01419991)

SELOSSE Sandrine and RICCI Olivia (2017), Carbon capture and storage: Lessons from a storage potential and localization analysis, *Applied Energy*, Volume 188, 15 February, pp.32-44; <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.117>

DIDELOT Alice, MAÏZI Nadia, MAZAURIC Vincent, ASSOUMOU Edi and SELOSSE Sandrine (2016), Balancing Energy Efficiency and Fossil Fuel: The role of carbon pricing, *Energy Procedia*, The 8<sup>th</sup> International Conference on Applied Energy – ICAE2016

KANG Seungwoo, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2015), Strategy of bioenergy development in the largest energy consumers of Asia (China, India, Japan and South Korea), *Energy Strategy Reviews*, 8, pp.56-65; doi:10.1016/j.esr.2015.09.003

SELOSSE Sandrine and RICCI Olivia (2014), Achieving negative emissions with BECCS (bioenergy with carbon capture and storage) in the power sector: New insights from the TIAM-FR TIMES Integrated Assessment Model France) model, *Energy*, Volume 76, 1, November 2014, Pages 967-975; doi:10.1016/j.energy.2014.09.014

BOUCKAERT Stéphanie, ASSOUMOU Edi, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2014), A prospective analysis of waste heat management at power plants and water conservation issues using a global TIMES model, *Energy*, Volume 68, Pages 80-91; doi:10.1016/j.energy.2014.02.008

DUBREUIL Aurélie, ASSOUMOU Edi, BOUCKAERT Stéphanie, SELOSSE Sandrine and MAÏZI Nadia (2013), Water modeling in an energy optimization framework – The water-scarce middle east context, *Applied Energy*, 101, 268-279; doi:10.1016/j.apenergy.2012.06.032

BOUCKAERT Stéphanie, SELOSSE Sandrine, DUBREUIL Aurélie, ASSOUMOU Edi and MAÏZI Nadia (2012), Analyzing Water Supply in Future Energy Systems Using the TIMES Integrating Assessment Model (TIAM-FR), *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, Volume 10, Number 1, 89-94; HAL: <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00793106>

## C. OUVRAGES ET CHAPITRES D'OUVRAGE

GLYNN, J., FORTES, P., KROOK-RIEKKOLA, A., LABRIET, M., VIELLE, M., KYPREOS, S., LEHTILÄ, A., MISCHKE, P., DAI, H., GARGIULO, M., HELGESEN, P.I., KOBER, T., SUMMERTON, P., MERVEN, B., SELOSSE, S., KARLSSON, K., STRACHAN, N., GALLACHÓIR, B.Ó. (2015), Economic Impacts of Future Changes in the Energy System—Global Perspectives, in: Giannakidis, G., Labriet, M., Gallachóir, B.Ó., Tosato, G. (Eds.), *Informing Energy and Climate Policies Using Energy Systems Models*, Lecture Notes in Energy. Springer International Publishing, pp. 333–358.

GLYNN, J., FORTES, P., KROOK-RIEKKOLA, A., LABRIET, M., VIELLE, M., KYPREOS, S., LEHTILÄ, A., MISCHKE, P., DAI, H., GARGIULO, M., HELGESEN, P.I., KOBER, T., SUMMERTON, P., MERVEN, B., SELOSSE, S., KARLSSON, K., STRACHAN, N., GALLACHÓIR, B.Ó. (2015), Economic Impacts of Future Changes in the Energy System—National Perspectives, in: Giannakidis, G., Labriet, M., Gallachóir, B.Ó., Tosato, G. (Eds.), *Informing Energy and Climate Policies Using Energy Systems Models*, Lecture Notes in Energy. Springer International Publishing, pp. 359–387.

SELOSSE Sandrine (2010), *Organisations des activités scientifiques et relation science industrie*, Editions Universitaires Européennes, 370p. ISBN : 978.613.1.54516.0

MAÏZI Nadia et HOURCADE Jean-Charles (coordonné par SELOSSE Sandrine) (2009), *Carbone et Prospective*, Presses des MINES, octobre 2009, 137p. ISBN : 978-291-1-25611-0

## D. CONFERENCES INTERNATIONALES AVEC COMITE DE SELECTION ET ACTES

DIDELOT Alice, MAÏZI Nadia, MAZAUURIC Vincent, ASSOUMOU Edi, SELOSSE Sandrine (2016), *Balancing Energy Efficiency And Fossil Fuel : The Role Of Carbon Pricing*, The 8th International Conference on Applied Energy, ICAE2016, 2016, Beijing, China. <hal-01439647>

KANG Seungwoo, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2016), *Contribution of global CO<sub>2</sub> emissions pledges to bioenergy market expansion: A long term analysis of bioenergy trade using TIAM-FR model*, 24<sup>th</sup> EUBCE – European Biomass Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 6-9 June (poster et actes)

SELOSSE Sandrine and MAÏZI Nadia (2016), *The place of Bio-energy with carbon capture and storage in the future Energy-Climate regime: a long-term analysis with TIAM-FR*, 24<sup>th</sup> EUBCE – European Biomass Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 6-9 June (Actes indexés dans SCOPUS)

SELOSSE Sandrine, KANG Seungwoo, MAÏZI Nadia (2016), *On the way to a decarbonized world: an analysis of the Paris Climate Agreement with TIAM-FR*, The 35th Edition of the International Energy Workshop (IEW), June 1-3, University College of Cork, Cork, Ireland

KANG Seungwoo, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2015), *What Development for Bioenergy in Asia: A Long-term Analysis of the Effects of Policy Instruments using TIAM-FR model*, IBSCE 2015, Oct 2015, Shanghai, China. ETA-Florence Renewable Energies, Proceedings of the International Bioenergy (Shanghai) and Asian Bioenergy Conference, pp.149-153 - ISBN 978-88-89407-13-4

MAÏZI Nadia, THIBOUST Matthieu, SELOSSE Sandrine, MAZAUURIC Vincent (2015) *Arbitrage between Energy Efficiency and Carbon Management in the Industry Sector: An Emerging vs. Developed Country Discrimination*. The 34th Edition International Energy Workshop (IEW) – International Renewable Energy Agency (IRENA), June, Abu Dhabi, United Arab Emirates.

SELOSSE Sandrine, GARCIA Nicolas (2014), *Technological trajectories for a low carbon future, Energy Challenges and Mechanics Conference*, 19-21 August, Aberdeen, Scotland

SELOSSE Sandrine, MAĪZI Nadia (2014), What commitments for the future climate regime: Long term decoding using TIAM-FR, 33<sup>rd</sup> edition of International Energy Workshop (IEW), 4-6 June, Beijing, China

SELOSSE Sandrine, RICCI Olivia, MALHOTRA Govind (2014), The decisive role of the carbon storage potential in the deployment of the CCS option, 37th IAEE International Conference, 15-18 June, New York City

SELOSSE Sandrine, RICCI Olivia, GARABEDIAN Sabine (2014), Reunion Island energy autonomy objective by 2030, EcoMod2014, International Conference on Economic Modeling, 16-18 July, Bali, Indonesia

SELOSSE Sandrine, MAĪZI Nadia (2014), A regional perspective to achieve the future climate regime: a long-term analysis with the TIAM-FR model, EcoMod2014, International Conference on Economic Modeling, 16-18 July, Bali, Indonesia

MAZAUURIC Vincent, THIBOUST Matthieu, MAĪZI Nadia, SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi (2014), Arbitrage between energy efficiency and carbon management: an industry sectorial study, Retool for a competitive and sustainable industry, ECEEE Proceedings (peer-reviewed paper), ECEEE 2014 Industrial Summer Study, ISBN: 978-91-980482-5-4 (online), 978-91-980482-4-7 (print)

POSTIC Sébastien, MAĪZI Nadia, SELOSSE Sandrine and ASSOUMOU Edi (2013), Energy trends in Latin America: a regional disaggregation meeting the requirements of the TIMES prospective approach, 4<sup>th</sup> ELAEE, Montevideo, Uruguay, April 8-9

SELOSSE Sandrine, POSTIC Sébastien, MAĪZI Nadia (2013), Energy resources and sustainable response to climate constraint in Latin America: A long-term analysis with TIAM-FR, 4<sup>th</sup> ELAEE, Montevideo, Uruguay, April 8-9

FORSELL Nicklas, SELOSSE Sandrine (2012), Importance of bioenergy markets for the development of the global energy system, IEW, Cape Town, South Africa, June 19-21

SELOSSE Sandrine, BOUCKAERT Stéphanie, ASSOUMOU Edi, MAĪZI Naidia (2012), Power system and carbon capture under climate policy: a water impact analysis with TIAM-FR, IEW, Cape Town, South Africa, June 19-21

DUBREUIL Aurélie, ASSOUMOU Edi, SELOSSE Sandrine, BOUCKAERT Stéphanie and MAĪZI Nadia (2011), 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

BOUCKAERT Stéphanie, SELOSSE Sandrine, DUBREUIL Aurélie, ASSOUMOU Edi, MAĪZI Nadia (2011), Analyzing Water Supply in Future Energy Systems Using the TIMES Integrated Assessment Model (TIAM-FR), 3rd International Symposium on Energy Engineering, Economics and Policy: EEEP 2011, Orlando, Florida, USA, July 19-22

SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi and MAĪZI Nadia (2011), 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 2011, Orlando, Florida, USA, July 19-22

BOUCKAERT Stephanie, SELOSSE Sandrine, DUBREUIL Aurelie, ASSOUMOU Edi, MAĪZI Nadia (2011), 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 2011), Stanford, California, USA, July 5-8

FORSELL Nicklas, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2011), Insights on the Chinese climate agenda: technical challenges, 30th International Energy Workshop (IEW 2011), Stanford, California, USA, July 5-8

SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi and MAÏZI Nadia (2011), Climate scenarios for developing and developed countries: A prospective analysis with TIAM-FR, 30th International Energy Workshop (IEW 2011), Stanford, California, USA, July 5-8

SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi, MAÏZI Nadia and MAZAUIC Vincent (2010), Post-Kyoto policy implications on the energy system: A TIAM-FR long-term planning exercise, XXI<sup>e</sup> World Energy Congress, Montreal, Canada, September 12-16

MAÏZI Nadia, SELOSSE Sandrine and ASSOUMOU Edi (2010), Power generation under post Copenhagen emission reduction pledges, 2nd International Conference on Engineering Optimization (ENGOPT), Lisbon, Portugal, September 6-9

SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi and MAÏZI Nadia (2010), CO<sub>2</sub> mitigation targets and technological limits: Prospective analysis with the TIMES integrated assessment model (TIAM-FR), International Energy Workshop (IEW), Stockholm, Sweden, June 21-23

SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi and MAÏZI Nadia (2010), 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

## **E. CONFERENCES NATIONALES AVEC COMITE DE SELECTION ET ACTES**

SELOSSE Sandrine, 2004, Organisation industrielle et relations science industrie : une mise en évidence à travers l'exemple des Génomies, SEDER XIV (Séminaire Européen des Doctorants en Economie Régionale), Institut d'Economie Régionale du Sud-Ouest, Université Montesquieu Bordeaux IV, 21-23 juin (Synthèse publiée dans la Revue d'Economie Régionale et Urbaine, 2005, I, p.129)

## **F. CONFERENCES INVITEES**

SELOSSE Sandrine (2013), Exercices de prospective à long terme du système électrique réunionnais, Journée de Recherche Eau-Energie, Université de la Réunion, 3 décembre 2013

SELOSSE Sandrine and RICCI Olivia (2012), Potentiels globaux et régionaux de la bioélectricité avec stockage du carbone, Séminaire « Les enjeux de la bioénergie dans les scénarios prospectifs de long terme énergie/climat », Ecole des Ponts ParisTech, CIRED, Campus du Jardin Tropical, 31 mai.

SELOSSE Sandrine, DUBREUIL Aurélie et BOUCKAERT Stéphanie (2011), Modélisation prospective et approche "système". Quelle application avec TIAM-FR?, séminaire "La Systémique", Centre des Risques et des Crises, MINES ParisTech, Sophia Antipolis, 29 mars

MAÏZI Nadia, SELOSSE Sandrine, GUERASSIMOFF Gilles (2009), "Energie et Développement Durable", Séminaire "Energie et Développement Durable", CERESUR, Université de la Réunion, 30 novembre. [hal-01330971](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01330971)

SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi et MAÏZI Nadia (2009), Impacts régionaux des enjeux mondiaux de réduction des émissions de GES: Prospective long terme à l'aide du modèle TIAM-FR, Séminaire "Energie et Développement Durable, CERESUR, Université de la Réunion, 30 novembre

## **G. CONFERENCES INTERNATIONALES AVEC COMITE DE SELECTION**

ASSOUMOU Edi and SELOSSE Sandrine (2016), Technology transfer challenges, UN Climate Change Conference 2016, COP22/CMP12/CMA1, 7-18 November, Marrakech, Morocco; UNFCCC pavilion, November 7<sup>th</sup>.

MAÏZI Nadia, DIDELOT Alice, MAZURIC Vincent, ASSOUMOU Edi, SELOSSE Sandrine (2016), Impacts of fossil fuel extraction costs and carbon pricing on energy efficiency policies, International Energy Workshop, Jun 2016, Cork Ireland. <hal-01439703>

POSTIC Sébastien, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2014), Combating Climate Change in Latin America: the energy prospect, UN Climate Change Conference 2014, COP20/CMP10, 1-12 December, Lima, Pérou; UNFCCC pavilion, December 3<sup>th</sup>.

SELOSSE Sandrine (2014), Toward the future Energy-Climate regime, UN Climate Change Conference 2014, COP20/CMP10, 1-12 December, Lima, Pérou; European Pavilion, December 2<sup>nd</sup>.

SELOSSE Sandrine, GARCIA Nicolas, MAÏZI Nadia (2014), Toward the future climate regime: A regional long term perspective of political targets and technological options, 14<sup>th</sup> IAEE European Energy Conference, 28-31 octobre, Rome, Italie

SELOSSE Sandrine (2013), A long-term analysis of access to electricity in Africa in a climate context, UN Climate Change Conference 2013, COP19/CMP9, 11-22 November, Warsaw, Poland; European pavilion, November 12.

SELOSSE Sandrine, BOUCKAERT Stéphanie, ASSOUMOU Edi, MAÏZI Nadia (2012), Power system and carbon capture under climate policy: a water impact analysis with TIAM-FR, United Nations Climate Change Conference, COP 18, Side Event, European Pavilion, Doha, Qatar, November 27<sup>th</sup>

ASSOUMOU Edi, BOUCKAERT Stéphanie, DUBREUIL Aurélie, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Naidia (2012), Modeling water and energy interactions in the long run, United Nations Climate Change Conference, COP 18, Side Event, European Pavilion, Doha, Qatar, November 27<sup>th</sup>

ATAYI Adrien, MAÏZI Nadia and SELOSSE Sandrine (2011), An 80% carbon-free Europe in 2050, what impacts on the European electric generation technologies uses?, International Conference on Carbon Reduction Technologies (Care Tech), Polish Jurassic Highland, Poland, 19-22 September

SELOSSE Sandrine and Olivia RICCI (2011), Global and regional potential for biomass energy with carbon capture and storage, International Conference on Carbon Reduction Technologies (Care Tech), Polish Jurassic Highland, Poland, 19-22 September

DUBREUIL Aurélie, SELOSSE Sandrine, BOUCKAERT Stéphanie and MAÏZI Nadia (2011), Water-Energy capital: sustainability implications through the implementation of water allocation in TIAM-FR energy model, SDEWES 2011. 6<sup>th</sup> UNESCO Conference on Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems, Dubrovnick, Croatia, September 25-29, 2011

SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi and MAÏZI Nadia (2011), 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

DUBREUIL Aurélie, BOUCKAERT Stéphanie, SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi and MAÏZI Nadia (2010), Implementing water allocation in the TIAM-FR energy model, International Conference "Water and Energy", International Water Association and Waternetwerk, Amsterdam, The Netherlands, November 10-12

BOUCKAERT Stephanie, SELOSSE Sandrine, DUBREUIL Aurelie, ASSOUMOU Edi and MAÏZI Nadia (2010), 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

SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi and MAÏZI Nadia (2010), 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

SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi, MAÏZI Nadia et LENTZ Benoît (2009), GHG mitigation targets by 2020: what international coordination?, 10th IAEE European Conference "Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies", Vienna, Austria, September 7-10

QUERE Michel, SELOSSE Sandrine (2005), «The Organisation of the Science-Industry Relationships in the Realm of the Life Science Industry: Learning from the French Genopoles», ELSIS International Conference, Edinburgh, 23-25 février

## **H. CONFERENCES INTERNATIONALES SANS COMITE DE SELECTION**

### **1. Interventions dans des sessions auto-organisées dans le Stream Long Term Planning in Energy, Environment and Climate” organisé par Nadia Maïzi, MINES ParisTech, CMA,**

SELOSSE Sandrine and MAÏZI Nadia (2016), What energy system after the Paris Climate Agreement, EURO XXVIII, European Conference on Operational Research, Poznan, Poland, July 3-6

KANG Seungwoo, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2015), India's long-term pathways for bioenergy:scenario analysis using TIAM-FR model, EURO XXVII, European Conference on Operational Research, Glasgow, Scotland, July 12-15

RICCI Olivia, SELOSSE Sandrine (2012), An evaluation of the European CCS potential, EURO XXV, Vilnius, Lithuania, July 8-11

ASSOUMOU Edi, GUERASSIMOFF Gilles, SELOSSE Sandrine and MAÏZI Nadia (2010), ETSAP modeling tools: a bottom-up framework for energy issues, 24th European Conference on Operational Research (EURO), Lisbon, Portugal, July 11-14

SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi and MAÏZI Nadia (2010), Regional impacts of post Copenhagen emission reduction pledges using TIAM-FR, 24th European Conference on Operational Research (EURO), Lisbon, Portugal, July 11-14

### **2. Workshop internationaux de la communauté de modélisateur**

SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi, GHERSI Frédéric, HOURCADE Jean-Charles, LI Jun, MAÏZI Nadia (2014), 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, February 4-5, Cork, Ireland

SELOSSE Sandrine (2014), TIAM Improvements on Carbon Storage, 5th Workshop for ETSAP-TIAM Collaboration, UCL Energy Institute, 2nd April, London, United Kingdom

POSTIC Sébastien, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2014), TIMES-America Latina y el Caribe: a TIMES model dedicated to South America and the Caribbean, 66th Semi-annual IEA-ETSAP workshop, UN City, 17-19 November, Copenhagen, Denmark.

SELOSSE Sandrine (2014), Carbon storage potential, 66th Semi-annual IEA-ETSAP workshop, UN City, 17-19 November, Copenhagen, Denmark

ASSOUMOU Edi, MAÏZI Nadia, SELOSSE Sandrine (2013), Renewables and future power systems : CMA's topics of interest for the ETSAP-IRENA session, IRENA / IEA-ETSAP Session : REMAP 2030, Jun 2013, Paris France. <hal-01322420>

SELOSSE Sandrine (2013), GHG reduction case of TIAM, 4th Workshop for ETSAP-TIAM collaboration, ECN, Amsterdam, 15th October

SELOSSE Sandrine (2013), Carbon storage analysis, 4th Workshop for ETSAP-TIAM collaboration, ECN, Amsterdam, 15th October

POSTIC Sébastien, SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi, MAZAUIC Vincent, MAÏZI Nadia (2013), Long-term assessment of energy efficiency solutions: Application to Active Control in the residential, Semi-annual ETSAP meeting – Paris – 18 June

SELOSSE Sandrine (2012), The issue of regionalizing the electricity sector in Africa, ETSAP-TIAM Workshop, Lisbon, Portugal, December 11.

SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi (2012), Transformation of the electricity sector of Africa in ETSAP-TIAM. First results, ETSAP-TIAM Workshop, Cape Town, South Africa, June 18

SELOSSE Sandrine (2011), TIAM-FR: Developments and questions, ETSAP-TIAM Workshop, IER, University of Stuttgart, Germany, May 4th

BOUCKAERT Stéphanie, SELOSSE Sandrine, DUBREUIL Aurélie, ASSOUMOU Edi and MAÏZI Nadia (2010), Implementing water allocation in the TIAM-FR energy model, ETSAP Workshop, University College Cork, Ireland, November 16-17

SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi and MAÏZI Nadia (2010), Regional impacts of the global carbon stakes: long term prospective with TIAM-FR, Joint TERI ETSAP Workshop, "Energy Modelling Tools and Techniques to address Sustainable Development and Climate Change, New Delhi, January 21-22

### **3. Workshop internationaux de restitution de projets européens**

QUÉRÉ Michel, SELOSSE Sandrine, 2004, Localized knowledge and the life sciences industry: some insights from the Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) region, International Conference « The Political Economy of Knowledge – Technological Knowledge and Localized Learning: What Perspectives for a European Policy? », 23-24 April, Turin

QUERE Michel, SELOSSE Sandrine, 2002, Knowledge dynamics in the life science industry: Learning from the French Genopoles policy, Meeting TELL (« Technological Knowledge and Localised Learning: What Perspectives for a European Policy ?»), 29-30 November, Sophia-Antipolis

## **I. CONFERENCES NATIONALES SANS COMITE DE SELECTION**

SELOSSE Sandrine (2014), Une analyse long terme du système électrique en Afrique dans un contexte climatique, Table ronde Prospective Energétique, Conférence DynamOSE, 15 janvier 2014, Paris.

SELOSSE Sandrine (2012), Enjeu de la régionalisation du secteur électrique en Afrique, Journée de la Chaire : Prospective des Enjeux Energie-Climat, 3 octobre, Paris

SELOSSE Sandrine (2010), Engagements post COP 15: Séquestration du carbone ou renouvelables?, Colloque "L'énergie par ses externalités" organisé à l'occasion des 10 ans du Mastère OSE (Optimisation des Systèmes Energétiques), Ajaccio et Corte, Corse, 5-7 mai

SELOSSE Sandrine (2009), Enjeux mondiaux et impacts régionaux des contraintes carbone. Prospective long terme à l'aide du modèle TIAM-FR, Journée de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable, Ecole des Ponts ParisTech, Marne-la-Vallée, 20 novembre

QUÉRÉ Michel et SELOSSE Sandrine (2007), « La politique génopoles en France : Enjeux et gouvernance », Séminaire MiRe-DREES "Recherche et innovation dans le domaine des biotechnologies : Spécificités et enjeux économiques", Ministère de la recherche, Carré des sciences, 14 et 15 juin [Accepté pour présentation au colloque]

QUÉRÉ Michel, SELOSSE Sandrine (2005), Etude d'impact économique de la politique des Génopoles en France, Séminaire « Sciences Bio-médicales, Santé et Société », CNRS (SHS-SDV)/INSERM/MiRe DREES, 15-16 novembre, Saint-Rémy-les-Chevreuse

QUÉRÉ Michel, SELOSSE Sandrine (2004), Les Génopoles en France, 3<sup>ème</sup> Rencontre de la Recherche avec les Entreprises: « Coopération Recherche Publique Recherche Privée: Une Stratégie Gagnante ? », Colloque organisé par l'Ecole Doctorale Marchés et Organisations, 26 mars, Sophia-Antipolis

## **J. WORKING PAPERS**

KANG Seungwoo, SELOSSE Sandrine and MAÏZI Nadia (2016), Methodological long-term analysis of global bioenergy potential, Working Paper, Les Cahiers de la Chaire, N°2016-03-21

POSTIC Sébastien, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2016), Energy sector contribution to regional climate action: The case of Latin America, Working Paper, Les Cahiers de la Chaire, N°2016-02-20

SELOSSE Sandrine and MAÏZI Nadia (2016), Exploring the biomass carbon capture solution to climate policy: A water impact analysis with TIAM-FR, Working Paper, Les Cahiers de la Chaire, N°2016-01-19

SELOSSE Sandrine, POSTIC Sébastien and MAÏZI Nadia (2015), Energy issue in Latin America face climate challenges: a long-term analysis with TIAM-FR, Working Paper, Les Cahiers de la Chaire, N°2015-03-17

SELOSSE Sandrine and MAÏZI Nadia (2015), Pending the adoption of an international climate agreement. An overview of the energy-climate regime, Working Paper, Les Cahiers de la Chaire, N°2015-02-16

POSTIC Sébastien, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2015), TIMES Prospective Modeling for South America, and applications, Working Paper, Les Cahiers de la Chaire, N°2015-01-15

SELOSSE Sandrine and GARCIA Nicolas (2014), CCS development for a low carbon future, Working Paper, Les Cahiers de la Chaire, N°2014-02-14

RICCI Olivia and SELOSSE Sandrine (2013), A cost analysis of the Copenhagen emission reduction pledges, Working Paper, Les Cahiers de la Chaire, N°2013-01-08

SELOSSE Sandrine, RICCI Olivia and MAIZI Nadia (2012), Fukushima's impact on the European power sector: A long-term policy analysis using TIAM-FR, Working Paper, Les Cahiers de la Chaire, N°2012-04-07

RICCI Olivia and SELOSSE Sandrine (2012), Achieving negative emissions in the power sector: A technological and regional approach with TIAM-FR, Working Paper, Les Cahiers de la Chaire, N°2012-03-06

RICCI Olivia and SELOSSE Sandrine (2011), Global and regional potential for bioelectricity with carbon capture and storage, Working Paper, Les Cahiers de la Chaire, N°2011-03-03

## **K. RAPPORTS DE PROJETS**

RAVIX Joël-Thomas, BLEUEL Petra et SELOSSE Sandrine, PROJET OEM, Rapport final, 2009, 135 pages

RAVIX Joël-Thomas, BLEUEL Petra et SELOSSE Sandrine, Les PME et l'exportation : la nécessité d'une politique industrielle horizontale, 2009, 37 pages

QUÉRÉ Michel, SELOSSE Sandrine, « Les Incidences Économiques de la Politique Génopoles en France », Appel à propositions Sciences Bio-médicales, Santé et Société (2003), Rapport final de recherche, mars 2006

YONNET Jean-Pierre, MINET Stéphane, HETRU Emmanuel, DE BRUYKER-FOSSE Maïté, PORE Sabrina et SELOSSE Sandrine, « La structuration des réseaux d'entreprises », UNSA Éducation, septembre 2004

IDEFI-CNRS (QUÉRÉ Michel, SAVIOTTI Pier Paolo, SELOSSE Sandrine), Université Libre de Bruxelles (MICHEL Jessica, van POTTELSBERGHE Bruno), « Life Sciences/biotechnology – State of the Art », Part I of Case Studies Results – Biotechnology, Projet TELL, février 2003

MICHEL Jessica, QUÉRÉ Michel, SELOSSE Sandrine, « Life sciences/biotechnology study in the Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) region », Part II of Case Studies Results – Biotechnology, Projet TELL, février 2003

## **L. AUTRES PUBLICATIONS**

### **1. Articles soumis en cours de révision**

SELOSSE Sandrine and MAÏZI Nadia (2016), The decarbonized pathways of the post-Paris climate policy, Climatic Change, Manuscript number: CLIM-D-16-00659, Soumission le 16/10/2016

SELOSSE Sandrine, GARABEDIAN Sabine, RICCI Olivia and MAÏZI Nadia (2016), Reunion Island: The renewable energy revolution, Renewable & Sustainable Energy Reviews, Manuscript number: RSER-S-16-02952, En revision, Soumission le 08/09/2016

KANG Seungwoo, SELOSSE Sandrine and MAÏZI Nadia (2016), Contribution of global GHG reduction pledges to bioenergy expansion, Journal of Biomass & Bioenergy, Manuscript number: JBB-D-16-01094, En révision

## **2. Posters**

BOUBAULT Antoine, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2016), Mineral Resources for a Low-Carbon Electricity, Future Earth Days, 30 November – 1<sup>st</sup> December, Paris

THIBOUST Matthieu, MAÏZI Nadia, SELOSSE Sandrine and MAZAURIC Vincent (2011), Arbitrage between energy efficiency and carbon management, International Conference on Carbon Reduction Technologies (Care Tech), Polish Jurassic Highland, Poland, 19-22 September

SELOSSE Sandrine, 2003, Organisation industrielle et relations science industrie : une mise en évidence à travers l'exemple des Génopoles, Doctoriales « Doc'06-83 », 14-19 septembre, Frejus

## **3. Traductions publiées**

FRENKEN Koen, van OORT Frank G. et VERBURG Thijs, « Variété, emploi et chômage aux Pays-Bas », Revue de l'OFCE, N° 104, janvier 2008

FONTANA Roberto et NESTA Lionel, 2007, Innovation et Sélection des Firmes : L'industrie des équipements en réseaux locaux, Revue de l'OFCE, janvier, n° 100, p. 121-142. DOI : 10.3917/reof.100.0121

MALERBA Franco et ORSENIGO Luigi, 2006, Biotechnologies et Industrie Pharmaceutique : Un modèle évolutionnaire conforme à l'histoire, Revue de l'OFCE, janvier, n° 96, p. 157-209..DOI : 10.3917/reof.096.0157

## **4. Newsletters dans la Revue électronique de l'ADMEO (Association Doctorale Marché et organisation) – La Newsletter de l'ADMEO<sup>35</sup>**

Fondée en 2001, l'ADMEO était une association pluridisciplinaire visant à soutenir les activités de recherche et d'enseignement des doctorants et docteurs en économie, droit et gestion, et à favoriser l'insertion professionnelle des jeunes docteurs. L'ADMEO est devenue l'AD-DESPEG, l'Association des doctorants de l'Ecole doctorale DESPEG (Droit et sciences politiques, économiques et de gestion).

« Développement durable : la biodiversité menacée par la biopiraterie », n°44, avril 2008

« Le Protocole de Londres dans un contexte de concurrence mondiale des systèmes de propriété intellectuelle », n°43, mars 2008

« Un guide de la propriété intellectuelle au service des pôles de compétitivité : la double face de la recherche académique », n°42, février 2008

« Plan Premier Brevet : retour sur une mesure destinée aux PME », n°37, juin 2007  
Reproduit dans la Newsletter de Lyon-entreprises (juillet 2007)

« « Le Plan Premier Brevet, pour une nouvelle dynamique des PME françaises...? », n°33, février 2007  
Reproduit dans la Newsletter de NetPME (mars 2007); cité dans Dico Du Net, l'Usinenouvelle.com et dans une note interne de l'INPI

« Coupe du Monde de Football 2006 : Brèves de Bière en Allemagne. », n°27, Rubrique « Actualité », juillet/août 2006

« Science et Industrie : Une nouvelle dimension pour l'Université (2) », n°26, Rubrique « Analyse », juin 2006

---

<sup>35</sup> Ces newsletters sont disponibles sur le lien suivant : [http://hp.gredeg.cnrs.fr/Sandrine\\_Selosse/](http://hp.gredeg.cnrs.fr/Sandrine_Selosse/)

« Le marché de la bière en France, brasseur d'innovations », n°23, Rubrique « Bonus – Spécial Anniversaire », mars 2006

Reproduit dans la Newsletter de Lyon-entreprises (mars 2006)

« Science et Industrie : de nouvelles perspectives (1) », n°22, Rubrique « Actualité », février 2006

Reproduit par l'Association des ingénieurs diplômés de l'ESTP ([www.sidetp.org](http://www.sidetp.org)) et dans la Newsletter de NetPME (n°238, avril 2006)

« Le harcèlement moral au travail : un délit en mal de définition », Rubrique « Dossier : Le harcèlement moral au travail », n°13, avril 2005

Reproduit dans les Newsletters de Création d'entreprise, de NetPME et de Convention-collective.fr

« Les produits informatiques, nouveau filon pour les contrefacteurs (?) », n°12, Rubrique « Actualité », mars 2005

Reproduit dans la Newsletter de Lyon-entreprises du 30 mars 2005

« Le stress lié au travail (2) – Le management du stress », Rubrique « Société », n°10, janvier 2005

Reproduit dans les Newsletters de NetPME, de Convention-collective.fr et de Lyon-entreprises du 14 janvier 2005

« Le stress lié au travail (1) – Définition et ampleur du phénomène », Rubrique « Société », n°9, décembre 2004

Reproduit dans les Newsletters de NetPME, de Convention-collective.fr et de Lyon-entreprises du 13 janvier 2005

« Délocalisation : Un thème...Un livre : Pierre VELTZ, Des lieux et des liens. Politiques du territoire à l'heure de la mondialisation » (Edition de l'Aube – Collection l'Aube Poche Essai, 2004, 160p), Rubrique « Délocalisations », n°7, octobre 2004

Reproduit dans la Newsletter de NetPME du 6 octobre 2004

## **M. SEMINAIRES INTERNES**

SELOSSE Sandrine, Le futur régime Energie-Climat sous TIAM-FR, Séminaire CMA, 15 décembre 2014

SELOSSE Sandrine, TIAM-FR: developments and questions, Séminaire CMA, 2 mai 2011

SELOSSE Sandrine, CO<sub>2</sub> Mitigation targets and technological limits: prospective with the TIMES Integrated Assessment Model (TIAM-FR), Séminaire CMA, 15 juin 2010

SELOSSE Sandrine, Regional impacts of the global carbon stakes: long term prospective with the TIMES Integrated Assessment Model (TIAM-FR), Séminaire CMA, 26 mai 2010.

SELOSSE Sandrine, TIAM-FR: Accord de Copenhague. Résultats préliminaires, Séminaire CMA, 26 avril 2010.

## CHAPITRE 5 : STRATEGIE DE RECHERCHE

### I. LES COLLABORATIONS DE RECHERCHE

Mon travail sur les questions d'évolution des systèmes énergétiques à l'aide du modèle d'optimisation bottom-up TIAM-FR m'a conduit à nouer ou intégrer différentes collaborations, qu'elles soient bilatérales ou multilatérales.

#### A. Consortium ETSAP-TIAM

Depuis 2011, date de sa création, je suis membre du consortium qui s'est constitué au sein de l'ETSAP et regroupant plusieurs utilisateurs des modèles TIAM dans le but d'un développement collaboratif de ETSAP-TIAM. L'objectif de ce consortium est plus précisément d'essayer de reproduire, avec le même succès, l'expérience de TIMES avec ETSAP-TIAM et, ainsi, de partager des améliorations et corrections apportées aux modèles par les équipes d'utilisateurs. Comme en ont en effet conscience les utilisateurs de TIAM, il n'est pas aisé de maintenir un tel modèle à jour ; ce consortium constitue ainsi un moyen de rester concurrentiel face aux autres modèles de cet acabit. A noter que l'ambition initiale proposée par le porteur du consortium allait même plus loin et était de permettre in fine à TIAM de devenir le meilleur modèle disponible. L'idée était alors de fusionner toutes les contributions dans une seule version commune de ETSAP-TIAM, qui serait alors continuellement distribuée aux participants du consortium. Les différentes équipes devaient alors entrer dans un mode de complète coopération et investir leur temps et ressources dans le développement d'un unique modèle commun. Pour autant, même si la perspective de développer un tel modèle de haut niveau était intéressante, notamment six équipes ont largement investi dans le développement du modèle spécifique suivant des perspectives de recherche propres à chaque laboratoire. Non seulement, le nouveau modèle aurait pu ne pas correspondre aux attentes ou aux priorités nationales mais aussi certains des changements apportés sont pratiquement incompatibles les uns avec les autres. Ainsi par exemple, l'extraction du Royaume-Uni de la région Europe de l'Ouest implémentée dans TIAM-UCL, n'est pas compatible avec celle des pays scandinaves implémentée dans VTT-TIAM. La piste d'un développement parallèle des modèles TIAM a ainsi été privilégiée et conservée, les contributions étant alors discutées et validées de concert.

Les missions du consortium sont ainsi de maintenir et d'apporter des développements à ETSAP-TIAM, afin d'offrir aux équipes d'utilisateurs participantes des sources d'amélioration du modèle qu'il est ensuite possible d'intégrer dans chaque version nationale. Le consortium permet aussi à ses membres moins expérimentés dans l'utilisation de TIAM de bénéficier de l'expérience des équipes ayant fortement investi dans le modèle. Ce consortium a connu plusieurs phases depuis sa création, phases caractérisées par différentes contributions que j'ai pu apporter.

#### 1. Phase 1 – 2011-2013 - Consortium ETSAP-TIAM sous la coordination de Markus BLESL, IER, Université de Stuttgart

Cette première phase du consortium a impliquée 11 centres de recherches européens : **CIEMAT** (Centro de Investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y tecnológicas, Espagne), **CMA** (Centre de Mathématiques Appliquées, France), **DTU/Risø** (National Laboratory for Sustainable Energy, Danemark), **ECN** (Energy research Centre of the Netherlands, Pays-Bas), **ENEA** (Italian National

Agency for new technologies, energy and sustainable economic development, Italie), **IER** (Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy of the University of Stuttgart, Allemagne), **IFE** (Institute for Energy Technology, Norvège), **JRC** (Joint Research Centre – Institute for Energy, Commission européenne), **UCL** (Energy Institute, University College London, Royaume-Uni), **VITO** (Flemish Institute for Technological Research, Belgique) et **VTT** (Technical Research Centre of Finland, Finlande). Elle a été coordonnée par l'IER.

Partant de la version 2010 officielle de ETSAP-TIAM, le consortium s'est ainsi efforcé de pérenniser le modèle en actualisant certaines données, en identifiant et corrigeant d'éventuels dysfonctionnements ou erreurs dans la base de données et la structure du modèle et en contribuant à un axe d'amélioration de ce dernier. L'intégration de ces divers développements a ainsi conduit à concevoir collectivement la version 2012 du modèle, ETSAP-TIAM<sub>2012</sub>.

Un travail préparatoire a tout d'abord consisté en une comparaison de modèles, entre ETSAP-TIAM et les différentes versions nationales de TIAM. Une série commune de scénarios a ainsi été définie et utilisée. Pour s'assurer d'une comparaison efficace, les résultats des modèles les plus importants ont également été définis et une feuille de résultats harmonisée a été conçue. Un programme d'organisation de workshops a par ailleurs été établi, au rythme de deux par an afin de faciliter les échanges et de confronter les avancées du travail collaboratif. A noter que j'ai organisé un de ces workshops au CMA à Sophia Antipolis, le 15 février 2012. Fort des enseignements de cette première étape comparative, des améliorations possibles dans la base de données du modèle, la structure et les technologies ont été spécifiées afin de générer cette nouvelle version commune de ETSAP-TIAM<sub>2012</sub>. La plupart des partenaires a ainsi apporté un développement dans le modèle avec un focus spécifique :

- CIEMAT : Le solaire à concentration avec stockage et les technologies des vagues et de la marée ;
- ECN : Le secteur de l'hydrogène ;
- IFE : La production d'électricité renouvelable : l'éolien (onshore et offshore) et l'hydroélectricité ;
- JRC : Les échanges mondiaux de gaz ;
- UCL : Le gaz de schiste ;
- VITO : Le développement du secteur du fer et de l'acier.

Ma contribution a porté sur le développement du secteur électrique de l'Afrique et plus précisément de sa régionalisation et de l'implémentation de scénarios d'accès à l'électricité. En effet, en comparaison avec sa démographie, l'Afrique consomme peu d'énergie. Plus de 60 % de la population africaine n'a pas accès à l'énergie commerciale et l'utilisation du bois de chauffage (Favennec, 2009)<sup>36</sup>. Par ailleurs, la croissance attendue de la population et le développement économique en Afrique conduiront à des besoins accrus en énergie. Paradoxalement, les ressources naturelles en Afrique sont importantes, que ce soit des combustibles fossiles ou du potentiel renouvelable qui reste encore largement inexploité à ce jour: l'Afrique dispose d'un potentiel hydroélectrique important et, dans une moindre mesure des énergies éolienne, solaire et géothermique. Mais le fait est que les réalités économiques et énergétiques sont différentes au sein du continent africain et de grandes disparités existent. Le mix énergétique de l'Afrique, bien que globalement similaire à d'autres continents, change

---

<sup>36</sup> Favennec Jean-Pierre (sous la direction de), 2009, *L'Énergie en Afrique à l'horizon 2050*, Rapport de l'Agence Française de Développement et de la Banque Africaine de Développement, 84p.

considérablement d'une région à l'autre. L'Afrique du Nord et l'Afrique du Sud représentent 75 % de l'énergie consommée par l'Afrique, alors même que le reste de l'Afrique, l'Afrique sub-saharienne, représente les trois quarts de la population. Les ressources et le potentiel de l'énergie sont inégalement répartis en Afrique, avec par exemple :

- Afrique du Nord (MENA): pétrole abondant et potentiel de gaz et de solaire à concentration,
- L'Afrique sub-saharienne: potentiel hydroélectrique,
- Afrique du Sud: le charbon.

La consommation d'électricité devrait croître de manière significative, mais particulièrement dans les régions du Nord et du Sud. Ainsi, au vue de leurs ressources et potentiels spécifiques, l'impact sur leur mix énergétique sera différent de celle exprimée par une représentation agrégée, telle qu'elle est implémentée dans le modèle TIAM. J'ai ainsi recalibré le secteur électrique et implémenté trois sous-secteurs suivant trois zones géographiques du continent : Afrique du Nord (MENA), Afrique sub-saharienne et Afrique du Sud. Des scénarios régionaux de vitesse d'accès à l'électricité modifiables par les utilisateurs ont aussi été intégrés. A titre d'illustration, la figure ci-dessous présente le mix électrique de l'Afrique avant et après implémentation des sous-régions :

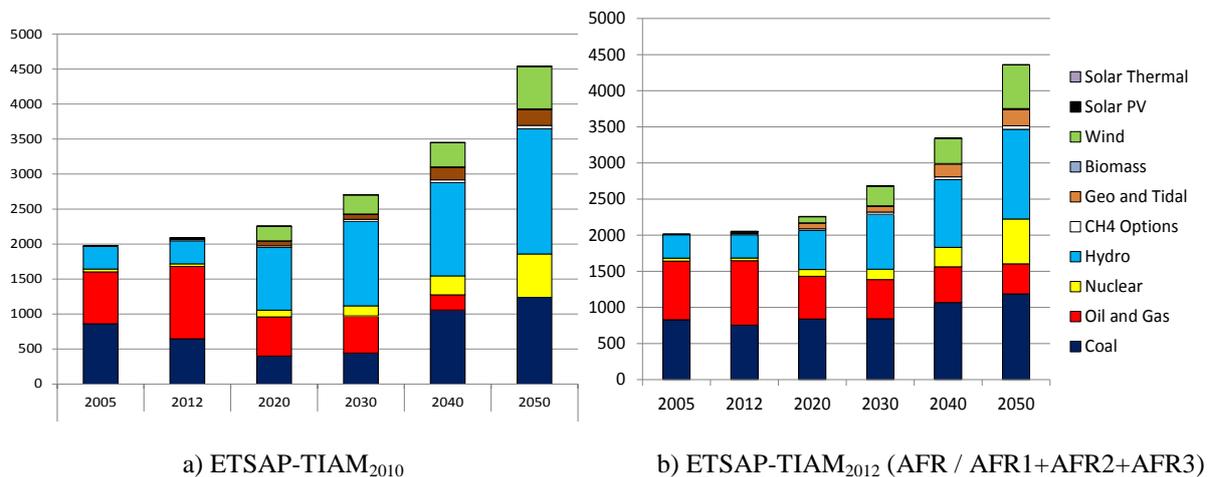


Figure 41. Mix électrique africain (PJ)

## 2. Phase 2 – 2013-2015 - Consortium ETSAP-TIAM sous la coordination de Markus BLESL, IER, Université de Stuttgart

Cette seconde phase du consortium fut également coordonnée par l'IER et a impliqué 10 centres de recherches européens : CIEMAT (Espagne), CMA (France), DTU (Danemark), ECN (Pays-Bas), IER (Allemagne), IFE (Norvège), JRC (Commission européenne), UCL (Royaume-Uni), VITO (Belgique) et VTT (Finlande). Le projet autour de ETSAP-TIAM a poursuivi son objectif de collaboration en vue de perfectionner le modèle et d'un développement continu d'une base de données. Une version ETSAP-TIAM<sub>2014</sub> en a résulté.

Les contributions des équipes membres du consortium ont cette fois-ci portées sur :

- CIEMAT : Un module dédié à la fusion nucléaire et mise à jour des données sur le nucléaire ;
- DTU : Amélioration des statistiques chinoises et correction des bugs liés ;
- ECN : Développement des technologies de CSC dans le secteur industriel ;

- IFE : Développement de la filière éolienne (suite) ;
- JRC : Les échanges mondiaux de gaz et de pétrole ;
- UCL : Développement dans le module climatique ;
- VITO : Le développement du secteur du fer et de l'acier (suite)

Pour la contribution du CMA, j'ai fourni une base de données et des scénarios différenciés de potentiels de stockage du carbone et de coûts de transport du carbone. En m'appuyant sur le travail de stage de Govind Malhotra que j'ai piloté en 2013, j'ai mis à jour les données concernant les potentiels de stockage du carbone et implémenté des scénarios alternatifs sur différents potentiels. Une distinction onshore et offshore des sites de séquestration du carbone a été intégrée lorsqu'elle n'existait pas (notamment pour les aquifères salins profonds qui représentent le plus grand potentiel dans la plupart des cas) et différentes données de coûts de stockage et de transport du carbone ont été ajoutées, là encore avec une distinction suivant la localisation onshore ou offshore du site.

### **3. Phase 3 – 2016-2017 – Forum collaboratif ETSAP-TIAM sous la coordination de Kenneth KARLSSON, DTU, Université Technique du Danemark**

Cette troisième phase a été lancée en juin 2016 sous la coordination du DTU de l'Université Technique du Danemark. Les membres partenaires sont **CIEMAT** (Espagne), **CMA** (France), **ECN** (Pays-Bas), **ENEA** (Italie), **LTU** (Luleå University of Technology, Suède), **UCC** (University College Cork, Ireland), **UCL** (Royaume-Uni), **VTT** (Finlande), et deux entreprises de consulting **E4SMA** (Energy, Engineering, Economic and Environment Systems Modelling Analysis, entreprise fortement impliquée dans l'ETSAP) et **NAJUB** (entreprise qui propose une plateforme collaborative en ligne). Cette collaboration est elle-aussi orientée vers la pérennisation et le développement de ETSAP-TIAM mais en s'appuyant sur une plateforme collaborative et un système de suivi de version et de gestion des modifications avec évaluation et tests avant implémentation (NAJUB et GIT) avec lesquels le DTU a enregistré de bons résultats dans le développement de leur modèle TIMES danois. L'objectif est, dans un premier temps, de tirer parti de leur expérience et de faire évoluer le modèle au gré de nouvelles mises à jour et correctifs apportés par les différents participants. Le focus est d'améliorer le modèle afin de permettre d'en tirer une meilleure analyse des politiques et notamment des contributions climatique nationales et du 6<sup>ème</sup> rapport du GIEC.

Un workshop de deux jours à Copenhague a été organisé en novembre 2016 où les participants ont pu bénéficier d'une formation à GIT.

Un projet a été soumis à l'ETSAP en novembre 2016 pour financement, et accepté. Dans ce cadre et de la contribution du CMA, je dois fournir des scénarios contrastés de potentiels de biomasse régionaux et tester leur implémentation dans le modèle via la nouvelle plateforme.

### **B. Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED), Ecole des Ponts ParisTech**

Le CIRED est co-fondateur, avec le CMA, de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable (MPDD), créée en 2008 et renouvelée en 2014. Dans le cadre des activités scientifiques relevant de cette chaire et au vue de mes missions d'animation et de coordination, des relations très étroites ont été nouées avec le CIRED et plus particulièrement avec l'équipe IMACLIM, IMACLIM étant l'architecture de modélisation développée au CIRED. Plus précisément, il s'agit d'un

modèle d'équilibre général, développé en version statique, IMACLIM-S, et en version dynamique IMACLIM-R. Au cours de la première phase de développement de la Chaire MPDD, des explorations méthodologiques ont été réalisées sur un couplage entre IMACLIM-R et TIAM-FR<sup>37</sup>. L'objectif de ce travail était de mettre en évidence des difficultés d'un tel couplage entre des modèles d'équilibre général top-down et des modèles technico-économiques bottom-up. J'ai alors particulièrement travaillé avec Frédéric GHERSI et Jun LI (CIRED). Les obstacles concernaient principalement le traitement des anticipations des acteurs et le comportement des marchés pétroliers. Ce travail a été discuté au sein de la communauté internationale ETSAP en 2014<sup>38</sup> et a donné lieu à la publication de deux articles<sup>39</sup> en 2015.

### C. Laboratoire d'Economie d'Orléans (LEO), Université d'Orléans

En juin 2010, lors la 33<sup>ème</sup> Conférence Internationale des Economistes de l'Energie (IAEE), à Rio de Janeiro, au Brésil, j'ai présenté une étude sur l'accord de Copenhague, la politique climatique post-COP 15 et ses conséquences sur les mix énergétiques régionaux, en insistant particulièrement sur les technologies de capture et séquestration du carbone (CSC)<sup>40</sup>. A cette occasion, j'ai rencontré Olivia RICCI, doctorante au Laboratoire d'Economie d'Orléans (LEO) qui travaillait sur la capture et le stockage géologique du CO<sub>2</sub> à partir de la biomasse (BCSC). Nous avons alors échangé à plusieurs reprises et entamé une collaboration jusqu'en septembre 2012, date à laquelle Olivia a rejoint le CMA dans le cadre d'un post-doctorat d'un an où nous avons pu approfondir nos travaux et particulièrement les valoriser par de nouvelles publications.

L'objet de la collaboration était dans un premier temps de développer la chaîne CSC dans le secteur bioélectrique de TIAM-FR et notamment d'implémenter des centrales à intrants charbon-biomasse, avec et sans CSC. Plus précisément, quatre technologies ont été créées, une centrale de co-combustion charbon et biomasse, cette dernière à hauteur de 20 %, avec et sans capture du carbone en post-combustion et une centrale de co-gazéification charbon-biomasse (également à hauteur de 20 %) avec et sans technologie de capture du carbone en pré-combustion. Nous avons alors entrepris d'étudier le rôle de la BCSC dans l'offre d'énergie optimisée sous contrainte climatique et notamment de discuter

---

<sup>37</sup> Un travail de couplage a également été réalisé entre IMACLIM-S (Frédéric GHERSI, CIRED) et TIMES-FR (Edi ASSOUMOU, CMA) dans le cadre d'un projet européen EV-STEP, coordonné par Edi ASSOUMOU.

<sup>38</sup> SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi, GHERSI Frédéric, HOURCADE Jean-Charles, LI Jun, MAÏZI Nadia (2014), *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, February 4-5, Cork, Ireland

<sup>39</sup> 1) GLYNN, et al. (2015), *Economic Impacts of Future Changes in the Energy System—Global Perspectives*, in: Giannakidis, G., Labriet, M., Gallachóir, B.Ó., Tosato, G. (Eds.), *Informing Energy and Climate Policies Using Energy Systems Models*, Lecture Notes in Energy. Springer International Publishing, pp. 333–358.

2) GLYNN, J., et al. (2015), *Economic Impacts of Future Changes in the Energy System—National Perspectives*, in: Giannakidis, G., Labriet, M., Gallachóir, B.Ó., Tosato, G. (Eds.), *Informing Energy and Climate Policies Using Energy Systems Models*, Lecture Notes in Energy. Springer International Publishing, pp. 359–387.

<sup>40</sup> SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi and MAÏZI Nadia (2010), *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 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00508608>

son potentiel à un niveau régional à l'horizon 2050. Ce travail a fait l'objet d'une publication dans *Energy Policy* en 2013 (article soumis en décembre 2011 et disponible en ligne en octobre 2012)<sup>41</sup>.

Dans un second temps, la mission d'Olivia au sein du CMA, de septembre 2012 à août 2013 a été de poursuivre l'analyse de la BCSC dans TIAM-FR et de travailler avec moi sur ses implications économiques dans les systèmes électriques. Dans ce contexte, nous avons discuté des coûts marginaux du carbone et d'abattement, toujours en situation de contrainte climatique à horizon de long terme. Ce travail collaboratif a fait l'objet de trois publications, une première en 2013 dans *Economics Bulletin*<sup>42</sup>, une deuxième dans *Energy Economics*<sup>43</sup> en 2013 et une troisième dans la revue *Energy*<sup>44</sup> en 2014.

## **D. Centre d'Economie et de Management de l'Océan Indien (CEMOI), Université de La Réunion**

Depuis 2009, j'entretiens une collaboration avec le Centre d'Economie et de Management de l'Océan Indien, le CEMOI, de l'Université de la Réunion, et plus précisément avec Sabine Garabedian, Maître de Conférences en Economie dans ce centre. Dans ce cadre, j'ai été invitée à présenter mon travail en novembre 2009 au cours d'un séjour de dix jours, et plus particulièrement j'ai participé à un séminaire portant sur « Energie et développement durable » organisé par le CEMOI. L'objectif de ces échanges était d'identifier des axes possibles de collaborations futures. J'ai de nouveau été invitée à présenter mon travail en décembre 2013 lors d'une Journée de Recherche Eau-Energie, organisée par le CEMOI. De plus, en tant que chercheuse invitée pendant une semaine au sein du centre, j'ai travaillé avec Sabine Garabedian et Olivia Ricci (recrutée Maître de Conférences au CEMOI après son post-doctorat au CMA) à la mise en œuvre d'un plan de recherche collaboratif axé sur le couplage de nos modèles respectifs, le modèle TIMES-Réunion pour le CMA (développé par Mathilde Drouineau dans le cadre de sa thèse de doctorat au CMA, soutenu en 2011<sup>45</sup>) et le modèle d'équilibre général GetRun développé par le CEMOI. En effet, le CEMOI étudie depuis plusieurs années le développement d'un modèle économique d'équilibre général calculable (MEGC) conçu pour étudier les spécificités de l'île de la Réunion. Ce modèle permet d'étudier les impacts macroéconomiques de l'autonomie énergétique en termes de croissance, d'emploi, de consommation, etc.

Ce plan de recherche s'est concrétisé par une participation conjointe à la Conférence EcoMod (International Conference on Economics Modeling) en 2014 à Bali, où nous avons présenté une étude sur l'objectif d'autonomie énergétique à l'horizon 2030 de l'Île de la Réunion : « Reunion Island

---

<sup>41</sup> RICCI Olivia and SELOSSE Sandrine (2013), Global and regional potential for bioelectricity with carbon capture and storage, *Energy Policy*, 52 (2013), 689-698. doi:10.1016/j.enpol.2012.10.027

<sup>42</sup> RICCI Olivia and SELOSSE Sandrine (2013), Regional impacts of post Copenhagen emission reduction pledges: prospective analysis with TIAM-FR, *Economics Bulletin*, Vol.33, N°1, pp. 764-777

<sup>43</sup> SELOSSE Sandrine, RICCI Olivia and MAÏZI Nadia (2013), Fukushima's impact on the European power sector: The key role of CCS technology, *Energy Economics*, Volume 39, September, pages 305-312, doi:10.1016/j.eneco.2013.05.013

<sup>44</sup> SELOSSE Sandrine and RICCI Olivia (2014), Achieving negative emissions with BECCS (bioenergy with carbon capture and storage) in the power sector: New insights from the TIAM-FR TIMES Integrated Assessment Model (France) model, *Energy*, Volume 76, 1, November 2014, Pages 967-975; doi:10.1016/j.energy.2014.09.014

<sup>45</sup> Mathilde DROUINEAU, Modélisation prospective et analyse spatio-temporelle : intégration de la dynamique du réseau électrique, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011.

energy autonomy objective by 2030 », avec rédaction d'actes. Cette étude a fait l'objet d'une soumission d'un article à *Renewable & Sustainable Energy Review* (en cours de révision)<sup>46</sup>.

Nous avons également répondu à deux appels à projet :

- 2014 : Projet ANR – Défi 2 Energie propre, sûre et efficace – Projet OSS974. Optimisation des Systèmes énergétiques Soutenables : vers l'autonomie énergétique de l'île de la Réunion :
  - CEMOI, Université de la Réunion ;
  - CMA, MINES ParisTech ;
  - OSU-R (Observatoire des Sciences de l'Univers), Université de la Réunion ;
  - Université de Laval, Québec.
- 2015 : Projet MOM – Ministère des Outre-Mer – Optimisation des Systèmes énergétiques Soutenables : vers l'autonomie énergétique de l'île de la Réunion :
  - CEMOI, Université de la Réunion ;
  - CMA, MINES ParisTech ;
  - PIMENT (Physique et Ingénierie Mathématique pour l'énergie et l'environnement), Université de la Réunion.

En octobre 2016, Sabine Garabedian est venue au CMA afin de travailler sur les possibles échanges à implémenter entre nos modèles respectifs. Un plan de recherche a ainsi pu être établi afin d'avancer dans cette voie dès 2017.

## **E. Groupe de Recherche en Droit, Economie et Gestion (GREDEG), Université de la Côte d'Azur**

Je suis chercheuse associée depuis 2012 au GREDEG, Groupe de Recherche en Droit, Economie et Gestion, un laboratoire de recherche pluridisciplinaire de l'Université de Nice Sophia Antipolis et du CNRS (UMR 7321). Je suis plus précisément rattachée au projet de recherche structurant « Stratégies économiques et règlements des litiges : Analyse des normes, des règles et des contentieux » coordonné par Patrice Bougette et Frédéric Marty.

Ce projet vise à croiser les perspectives juridiques avec celles de l'analyse économique et des sciences de gestion pour analyser la formation, l'interprétation et l'activation des règles et des normes. Il s'intéresse à la manière dont les acteurs économiques réagissent vis-à-vis des règles de droit, non seulement dans le cadre de leur création mais aussi dans la manière de les activer lors de règlements de différends. Cinq domaines de recherche sont concernés par ce projet, je suis associée à celui portant sur « Concurrence et industrie ». Les travaux menés à la confluence de l'économie industrielle et du droit de la concurrence portent notamment sur les mesures correctives dérivant des décisions des juges de la concurrence qu'elles soient rendues sur une base contentieuse ou sur une base négociée. Les remèdes ou plus largement les engagements peuvent en effet être aussi bien utilisés en matière de concentration d'entreprises (e.g., affaire CanalSat/TPS) que d'abus de position dominante (e.g., RWE ou E.on). Les problématiques de l'effet incitatif des remèdes mais aussi de leur adéquation au problème de concurrence identifié et de leur proportionnalité structurent les travaux en cours. Les

---

<sup>46</sup> SELOSSE Sandrine, GARABEDIAN Sabine, RICCI Olivia and MAÏZI Nadia (2016), Reunion Island: The renewable energy revolution, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Manuscript number: RSER-S-16-02952, En cours de révision

remèdes relatifs aux abus de position dominante présentent en outre une forte spécificité sectorielle en ce qu'ils portent particulièrement sur le secteur de l'énergie. Les recherches menées dans le champ de la concurrence portent également sur les déterminants et les effets incitatifs des décisions des juges de la concurrence au travers de réflexions sur la prise en compte des effets des pratiques pour caractériser une infraction aux règles de concurrence et sur l'impact de l'introduction de barèmes en matière de sanctions pécuniaires. Cette dernière problématique permettant de développer une approche comparative entre les pratiques de différentes autorités administratives indépendantes, notamment dans les domaines concurrentiels et boursiers<sup>47</sup>.

Dans le cadre de cette collaboration avec le GREDEG, nous avons répondu à trois appels à projets :

- 2013 : ENRS – Transition énergétique : Ressources, Société, Environnement – La transition énergétique, nouvel enjeu industriel et commercial :
  - GREDEG, UNS-CNRS ;
  - CMA, MINES ParisTech ;
  - OFCE (DRIC).
- 2014 : ANR – Défi 1 Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique  
Projet PIVERT. La politique industrielle verte dans l'arène commerciale internationale :
  - GREDEG, UNS-CNRS ;
  - CMA, MINES ParisTech ;
  - OFCE (Science Po).
- 2016 : Appel à projets Académie 5 Homme, Idées, Milieux – IDEX UCAJEDI  
Projet MUFFINS. Measuring nudges' efficacy on energy consumption :
  - GREDEG, UNS-CNRS, Université de la Côte d'Azur
  - CMA, MINES ParisTech

## **II. LES PROJETS DE RECHERCHE**

### **A. Les projets en cours et achevés**

Les projets de recherche rapportés ici sont ceux réalisés depuis mon entrée au CMA, pour lesquels j'ai participé fortement au montage et à la mise en œuvre. Je ne présente pas les projets de recherche auxquels j'ai participé avant 2008. Ils sont cependant renseignés la partie consacré à la période de thèse.

#### **1. Chaire Modélisation prospective au service du développement durable**

Lors de mon entrée au CMA en mai 2008, ma principale mission était de travailler au lancement de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable (MPDD) aux côtés de Nadia Maïzi qui en est co-fondatrice et co-directrice. La Chaire MPDD a été officiellement lancée en décembre 2008 et renouvelée 2014.

---

<sup>47</sup> A noter que la présentation de ce projet est intégralement issue d'extraits de la fiche projet du laboratoire.

### **a. Phase 1 – 2008-2013 – Consolidation des outils et du dialogue Economistes/Ingénieurs**

La Chaire Modélisation prospective au service du développement durable, chaire MPDD, a été créée en 2008 à l'initiative du CMA et du Centre International de Recherches sur l'Environnement et le développement (CIRED), et plus précisément de Nadia Maïzi et de Jean-Charles Hourcade, respectivement directrice/directeur du CMA et du CIRED. Fort de son expertise en modélisation prospective, le CMA s'est ainsi associé au CIRED – Unité Mixte de Recherche (UMR 8568) sous tutelle principale du CNRS et de l'École des Ponts ParisTech, avec l'École des Hautes Études en Sciences Sociales, AgroParisTech-ENGREF et le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) – autour de l'ambition commune de pérenniser des outils de modélisation prospective sur les enjeux du développement durable et de la double contrainte énergie-climat. Ayant fait le constat du déficit en France d'une culture de la prospective dans l'expertise de dossiers aussi importants que la transition énergétique, le changement climatique, la gestion des ressources et les politiques d'environnement, les deux équipes ont décidé d'aborder ces enjeux scientifiques de manière complémentaire en liant leurs compétences en mathématiques appliquées et en sciences économiques et de gestion. Le projet de la Chaire MPDD repose ainsi sur le diagnostic partagé de :

- l'importance d'un dialogue économistes-ingénieurs, point critique de toute prospective efficace qui devra intégrer les sciences de la nature ;
- l'utilité de modèles « hybrides » pour dépasser les limites actuelles du dialogue parfois conflictuel entre la prospective technologique (bottom-up) et la prospective économique (top-down), et endogénéiser les liens entre l'économie et le changement technique ;
- l'imbrication des dossiers énergie – climat et quatre enjeux clefs du développement durable : la compétition entre les usages agricoles, forestiers et énergétiques des sols ; les dynamiques urbaines et les transports ; les tensions sur l'eau et les ressources primaires ; la dimension spatiale des politiques d'investissement industriel ;
- la nécessité d'une représentation plus réaliste des comportements des entreprises et des consommateurs dans des systèmes institutionnels donnés.

Industriels et acteurs institutionnels ont rallié cette ambition et apporté leur soutien à la Chaire afin de participer à l'émergence en France de cette plateforme de modélisation prospective, tel un centre de ressources appliqué aux enjeux de développement durable que constituerait la chaire et qui aurait vocation à faciliter la prise de décision à partir de scénarios d'avenirs possibles portant sur des questions de politiques énergie et climat, de développement industriel et de choix technologiques.

Lancée en décembre 2008, la Chaire MPDD est ainsi portée par les écoles MINES ParisTech, École des Ponts ParisTech, AgroParisTech, le PRES ParisTech, par les Fondation Ponts ParisTech et MINES ParisTech, et en partenariat avec l'ADEME, EDF, RENAULT, SCHNEIDER ELECTRIC et TOTAL. La Chaire est dotée d'un budget total sur 5 ans de 2,5 millions d'euros, réparti à parts égales entre le CMA et le CIRED.

Au sein de la Chaire MPDD, mes missions sont de deux ordres : recherche et coordination. S'agissant de la recherche, c'est dans ce cadre que je travaille au développement de TIAM-FR et que j'ai réalisé des analyses prospectives des enjeux mondiaux Energie-Climat (engagement post-Copenhague, calage des critères climatiques (ppm, W/m<sup>2</sup>, tonnes de CO<sub>2</sub>)). En particulier, la chaire a permis de financer

l'intégration de l'eau dans le modèle TIAM-FR via un stage de Mastère spécialisé OSE (Stéphanie Bouckaert), et d'amorcer le travail sur le recalibrage du modèle, via également un stage de Mastère spécialisé OSE (Nicolas Garcia). Un autre focus de recherche majeur au sein de la Chaire MPDD a consisté à travailler avec le CIRED à une tentative de couplage du modèle bottom-up d'équilibre partiel TIAM-FR et du modèle top-down d'équilibre général IMACLIM-R développé par le CIRED. En effet, la Chaire MPDD vise au développement et à la maintenance d'outils de modélisation et d'aide à la décision aux interfaces économie – ressources – climat, fondés sur l'articulation entre des modèles technico-économiques (type TIMES) et des modèles décrivant les interdépendances économiques sur la moyenne et longue durée (type IMACLIM). Ainsi dans cette optique, j'ai travaillé en étroite collaboration avec Jun Li et Frédéric Gherzi, alors tous deux chercheurs au CIRED. Ce travail a conduit à la publication de deux chapitres d'ouvrages<sup>48</sup>. Il a également été présenté lors d'un workshop international<sup>49</sup>.

J'occupe également la fonction de coordinatrice/animatrice de la Chaire MPDD. En plus d'avoir un rôle de communication et de contact avec les partenaires industriels et institutionnels, j'assume différentes charges facilitant le fonctionnement de la Chaire et permettant un rayonnement académique national et international :

- Organisation des comités de pilotage (environ 4-5 par an) et d'orientation (un par an) de la Chaire, incluant l'élaboration des documents supports des réunions, et notamment les budgets.
- Organisation des évènements, comme :
  - 5 Journées annuelles de la Chaire
  - 5 Séminaires intra-entreprises (TOTAL en 2010, SCHNEIDER ELECTRIC en 2012, ADEME en 2013)
  - 3 manifestations du CMA organisées dans le cadre de la Chaire
  - 10 restitutions de travaux (5 CMA et 5 CIRED)
- Editrice des Cahiers de la Chaire (working papers : 12 numéros sur la période 2008-2013), et des Petits Cahiers de la Chaire (newsletters : 13 numéros)
- Webmaster et conception des supports de communications et de valorisation scientifique (conception et mise à jour du site Web de la Chaire, création du logo de la Chaire, des plaquettes de communication, des flyers, etc.).

A noter également que la Chaire MPDD a été lancée officiellement le 16 décembre 2008 à MINES ParisTech sur son site de Sophia Antipolis, lors d'un workshop sur le thème « Carbon and Prospective ». Ce workshop a été conjointement organisé par le CMA, le CIRED et l'ETSAP. Il a en effet été intégré au programme du Workshop bi-annuel international de l'ETSAP qui s'est déroulé à Sophia Antipolis du 15 au 17 décembre 2008. J'étais en charge de l'organisation de ces deux

---

<sup>48</sup> GLYNN, J., et al., 2015. Economic Impacts of Future Changes in the Energy System—Global Perspectives, in: Giannakidis, G., Labriet, M., Gallachóir, B.Ó., Tosato, G. (Eds.), *Informing Energy and Climate Policies Using Energy Systems Models*, Lecture Notes in Energy. Springer International Publishing, pp. 333–358.

GLYNN, J., et al., 2015. Economic Impacts of Future Changes in the Energy System—National Perspectives, in: Giannakidis, G., Labriet, M., Gallachóir, B.Ó., Tosato, G. (Eds.), *Informing Energy and Climate Policies Using Energy Systems Models*, Lecture Notes in Energy. Springer International Publishing, pp. 359–387.

<sup>49</sup> SELOSSE Sandrine, ASSOUMOU Edi, GHERSI Frédéric, HOURCADE Jean-Charles, LI Jun, MAÏZI Nadia (2014), 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, February 4-5, Cork, Ireland

événements et le lancement de la chaire a fait l'objet de la publication d'un ouvrage édité par Nadia Maïzi et Jean-Charles Hourcade que j'ai coordonné<sup>50</sup>.

### **b. Phase 2 – 2014-2019 – Plateforme de modélisation prospective**

En 2014, la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable a été reconduite pour une période de 5 ans, renouvelant son objectif de constituer une force vive de facilitation de la prise de décision dans les débats liés à la double contrainte Energie-Climat. Cette nouvelle phase de la Chaire MPDD est soutenue par l'ADEME, EDF, GRTgaz, SCHNEIDER ELECTRIC et la Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC) du Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer (MEEM). La Chaire est dotée d'un budget total sur 5 ans de 1,6 millions d'euros, réparti à parts égales entre le CMA et le CIRED.

Forte de la structure à vocation pérenne qu'elle s'est attachée à construire les cinq premières années de son fonctionnement<sup>51</sup>, autour du développement et du maintien de ses outils de modélisation, des exercices de prospective réalisés sur les enjeux aux interfaces économie-climat-ressources que ce soit à l'échelle française ou internationale ou encore de la « culture de la prospective » qu'elle a su valoriser et diffuser par des cycles de conférences et le développement de formations de haut niveau, la Chaire MPDD axe cette nouvelle phase sur le renforcement de la plateforme de modélisation prospective et sa présence comme lieu de débat. Plus précisément, il s'agit de permettre les échanges et la confrontation entre équipes de modélisation, administrations et partenaires de la Chaire autour d'éclairages que la modélisation prospective peut apporter sur les politiques publiques liées à la transition énergétique, notamment en France.

Mes activités de recherche au sein de la Chaire MPDD se poursuivent au niveau du développement de TIAM-FR et de l'analyse prospective des enjeux mondiaux Energie-Climat avec un focus sur les engagements post-Paris. La Chaire MPDD finance également une thèse de doctorat sur un travail d'implémentation d'un marché des bioénergies dans TIAM-FR que je supervise (Seungwoo Kang, début de thèse au dernier trimestre 2014).

J'assure toujours la coordination de la Chaire MPDD et donc les relations avec les partenaires de la Chaire, l'organisation des événements et des réunions de fonctionnement. Je suis toujours éditrice des Cahiers de la Chaire et co-éditrice des Bulletins de la Chaire (qui ont remplacé les Petits Cahiers de la Chaire). Je m'occupe de la mise à jour du site Web qui a été totalement refondé en 2014/2015 et de la co-conception des supports de communications et de valorisation scientifique, travaillant désormais davantage en étroite collaboration avec la chargée de communication de la délégation de Sophia Antipolis de MINES ParisTech. Au regard du projet de développement de plateforme de modélisation prospective de la Chaire MPDD, cette dernière se donne comme ambition d'organiser plusieurs « Séminaires sur les Enjeux clefs pour la modélisation de la transition bas carbone » qui seront déclinés en séminaires de travail et qui se centreront sur les controverses clés portant sur les contraintes physiques, techniques et économiques de cette transition ainsi que la manière dont les politiques publiques peuvent les intégrer, de façon à maximiser les bénéfices économiques et sociaux de cette transition. Des « Ateliers méthodologiques » seront également organisés autour des données

---

<sup>50</sup> MAÏZI Nadia et HOURCADE Jean-Charles (coordonné par SELOSSE Sandrine) (2009), *Carbone et Prospective*, Presses des MINES, octobre, 137p. ISBN : 978-291-1-25611-0

<sup>51</sup> Le rapport d'activités de la Chaire MPDD 2008-2013 est disponible sur le site Web de la chaire : <http://www.modelisation-prospective.org/fr>

accessibles, des résultats obtenus et des choix méthodologiques opérés. Ils aideront à la fois à comprendre les conditions d'un bon usage des modèles dans leur état actuel de développement et à discuter, entre modélisateurs et utilisateurs, les obstacles méthodologiques à lever pour une amélioration des outils. Il est prévu que ces débats seront mis à disposition du public intéressé, y compris les résultats des modèles. Une interface est en cours de développement sur le site Web de la Chaire.

Enfin, à titre indicatif, depuis le renouvellement de la Chaire, onze Cahiers de la Chaire (working papers) et cinq Bulletins de la Chaire ont été édités, deux journées de la Chaire ont été organisées, ainsi que, deux conférences de presse, trois manifestations du CMA organisées dans le cadre de la Chaire et trois séminaires intra-entreprises (SCHNEIDER ELECTRIC en 2014, EDF en 2016 et GRTgaz en 2016). Deux séminaires ont également été organisés en 2016 dans le cadre de la plateforme de modélisation prospective.

## **2. Projet ETSAP : Enhancement of ETSAP E-TechDS database with cooling technology parameters for power plants – 2016**

Ce projet a été soumis en avril 2015 à l'ETSAP dans le cadre de leur programme de financement de projets. Il est porté par ECN (Energy research Centre of the Netherlands, Pays-Bas), CENSE (Center for environmental and sustainability research, Portugal) et CMA (MINES ParisTech). J'ai collaboré à la rédaction de la proposition et suis en charge de la contribution du CMA. ECN est le coordinateur de ce projet au budget global de 21 750 euros, dont 3 750 euros affectés pour le CMA. Les livrables du projet doivent être rendus en novembre 2016, à savoir :

- Revue de littérature, de rapports, de bases de données disponibles sur les systèmes de refroidissement et des mesures d'économie d'eau pour les centrales électriques (caractérisation incluant les paramètres technico-économiques) ;
- Rapport sur la méthodologie et les sources de données pour l'ensemble des données collectées et présentées ;
- Fiches techniques ETech-DS pour les centrales électriques avec les caractéristiques des technologies de refroidissement.

Plus précisément, s'agissant de ce projet, les systèmes énergétiques et de ressources en eau sont fondamentalement liés. Nous ne pouvons pas gérer ces deux ressources isolément dans la mesure où la disponibilité de l'un affecte la disponibilité de l'autre. Aussi, la disponibilité décroissante de l'eau aura inéluctablement un impact sur le secteur de l'énergie, quant à lui croissant. Selon l'OCDE, le secteur énergétique est responsable de 15 % des prélèvements globaux d'eau douce en 2010. En 2030, la demande mondiale d'eau, y compris pour l'énergie, devrait dépasser l'offre d'environ 40 %. Au moins un tiers de cette demande sera liée aux bioénergies. L'empreinte sur l'eau des différentes technologies du secteur énergétique peut donc être appelée à devenir une question de concurrence. Le secteur de l'énergie cite l'eau comme un des six thèmes clefs qui définira son avenir et elle devient un facteur de plus en plus important pour évaluer la faisabilité physique, économique et environnementale des projets énergétiques.

Pour analyser le futur déploiement des technologies et les politiques du secteur énergétique, le nexus eau-énergie constitue un sujet essentiel à traiter et les outils de modélisation doivent être envisagés pour cela. La série de fiches techniques ETSAP Energy Technology Data Source (E-TechDS)<sup>52</sup>

---

<sup>52</sup> Pour un aperçu des fiches techniques ETSAP : <http://iea-etsap.org/index.php/energy-technology-data>

renseigne sur une gamme complète de technologies de l'énergie avec une quantité de paramètres technico-économiques visant à caractériser les technologies. Cependant, l'information sur la consommation en eau des technologies demeure absente jusqu'à présent. Ce projet cherche donc à répondre à ce déficit et propose d'enrichir les E-TechDS par différentes technologies de refroidissement et leurs principales caractéristiques dans le cadre des technologies de production d'électricité.

ECN, CENSE et CMA tentons donc de concert de faire un recensement des informations les plus à jour disponibles et de réaliser ces rapports et fiches techniques.

### **3. Projet MUFFINS : Measuring nudges' efficacy on energy consumption - 2016**

Ce projet a été soumis dans le cadre de l'Appel à projet de recherche de l'Académie 5, Homme, Idées, Milieux, de l'IDEX UCA<sup>JEDI</sup>. Il est porté par le GREDEG (UNS-CNRS). Le budget total de ce projet d'une durée de un an est de 10 000 euros et est financé sur les fonds de l'IDEX UCA<sup>JEDI</sup>. Ce budget est destiné à financer la mise en place de l'expérimentation, la contribution de deux stagiaires designers pour la réalisation des supports visuels et leur installation sur le terrain, l'organisation d'un workshop final avec invitation de chercheurs extérieurs au projet et la participation à des conférences pour présenter les résultats de l'étude. Mon rôle au sein de ce projet a été et sera une participation à la rédaction de la proposition, une collaboration dans la mise en place de l'expérimentation et dans l'analyse des résultats, une contribution à la rédaction des articles, à la présentation de résultats et à l'organisation de l'évènement de restitution finale.

Concernant le projet, il se place dans un contexte où la réduction de la consommation énergétique constitue un enjeu important tant du point de vue financier - en ce sens où la facture énergétique d'un ménage représente pour 2 français sur 3 une part importante du budget du foyer - qu'environnemental avec la question de la raréfaction des ressources, le réchauffement climatique et la pollution. Or de nombreux comportements individuels permettraient de réduire le coût social des activités énergétiques mais aussi la facture énergétique de chacun. Des politiques publiques ont été développées dans ce champ (taxes, normes de consommation énergétique, subventions, marchés de certificats vert, etc.). Dans le champ de l'économie comportementale une attention particulière est donnée à l'utilisation, souvent complémentaire, de politique dite de nudge. Un nudge ('coup de pouce') est une forme de politique publique qui vise à modifier les comportements individuels sans passer par une incitation financière (taxe), ou une obligation (norme), mais en fournissant une information aux individus leur permettant d'avoir le comportement voulu par les décideurs. L'objectif du projet de recherche MUFFINS s'inscrit dans cette perspective d'économie comportementale. Nous proposons une expérimentation de terrain - field experiment - où nous testerons l'effet des nudges appliqués à la consommation énergétique. Nous conduirons cette expérimentation de terrain auprès d'entreprises françaises afin de mesurer l'effet de trois programmes permettant de faire des économies d'énergie. L'expérimentation reposera sur un grand nombre d'entreprises prises au hasard (équipées de GTB - Gestion Technique du Bâtiment - de l'entreprise WIT<sup>53</sup>) et ayant accepté au préalable de participer à l'expérimentation (environ une centaine d'entreprise disposent de ces systèmes installés). Notre travail cherchera alors à comparer l'efficacité de différents types de nudge en termes de diminution de la

---

<sup>53</sup> La société WIT fournit des pinces ampérométriques à des entreprises afin que celles-ci puissent établir un suivi énergétique de leur bâtiment. La particularité de cette société est qu'elle stocke les données de consommation énergétique des entreprises en question.

consommation énergétique des individus. Le premier nudge testé renvoie aux sentiments moraux des individus, le second sensibilise les individus à travers des messages visuels – stickers - et enfin le dernier fait appel à la comparaison sociale. Plus précisément, le premier programme ‘appel moral’ testé consistera à envoyer par courriel un message incitant les salariés à adopter un comportement respectueux de l’environnement en diminuant leur consommation d’énergie. Le second programme ‘stickers’<sup>54</sup> reposera sur des messages visuels qui fourniront, de façon ludique, des informations sur de nombreux gestes quotidiens permettant ainsi de réduire la consommation énergétique individuelle et globale de l’entreprise. Par exemple, nous pourrions apposer un autocollant sur le thermostat de réglage des bureaux en indiquant le niveau de température recommandée, en soulignant que réduire la température de chaque pièce de 1°C entraîne une diminution de la consommation énergétique individuelle de 7 %. L’objectif étant de cumuler ce type de nudge sur plusieurs habitudes sur lesquelles nous pouvons agir quotidiennement. Enfin le troisième programme ‘comparaison sociale’, consistera à fournir aux salariés une information sur la consommation énergétique globale de leur entreprise au regard de celle d’entreprises voisines. Nous choisirons des actions économes en temps. Ainsi, nous pourrions exclure le caractère coûteux en temps comme un moteur important dans le cadre étudié.

Les données collectées feront l’objet de traitements statistiques et économétriques permettant non seulement de déterminer l’impact d’une politique publique de type nudge sur la maîtrise de l’énergie, mais aussi de comparer l’efficacité de ces différents nudges. Et cela avec une analyse fine puisque nous aurons au préalable établi un questionnaire permettant de caractériser les profils des participants. Cette expérimentation permettra ainsi de générer une base de données originale et valorisable à travers des publications académiques dans un large éventail de revues scientifiques de qualité en économie de l’énergie (Energy Journal, Energy Economics, Energy Policy, Environmental and Resource Economics) et fera l’objet de présentations en conférences. Cette étude nous permettra également de proposer un livre blanc qui recueillera des recommandations à l’égard des entreprises mais aussi d’organismes publics.

#### **4. Projet ECOTYPE « Prospective, aménagement du territoire, développement durable et vision artistique », 2011-2013**

Initié en 2011 par Benoît Colardelle de la société Scèn&Act et Frédéric Alemany du Hublot, le projet ECOTYPE est le fruit d’un partenariat riche et diversifié en « Prospective, aménagement du territoire, développement durable et vision artistique ». Réunissant des chercheurs, des artistes et des industriels, ECOTYPE est une expérimentation visant à développer un outil sous forme d’un jeu éducatif dont l’objet est d’aider les collectivités locales à communiquer avec leurs administrés et à les sensibiliser sur les enjeux de l’aménagement du territoire et du développement durable. Ce projet a constitué une première en France en innovant notamment avec une approche ludique, interactive et artistique.

Le principe du jeu est d’inviter les habitants et usagers d’une commune à intervenir sur différents critères dans le but d’aménager harmonieusement leur commune sur les dix à cinquante prochaines années. Ils doivent ainsi relever de multiples défis, comme la raréfaction des ressources énergétiques, le changement climatique, l’augmentation de la démographie, etc.

---

<sup>54</sup> Les supports visuels de ce programme seront réalisés par des stagiaires en design que nous recruterons.

Un dôme géodésique immersif abrite alors un dispositif scénographique et interactif mettant en jeu une représentation du Plan local d'urbanisme (PLU) de la commune hôte. Le public est invité à intervenir en opérant plusieurs choix sur les différentes zones du PLU. Les critères de choix peuvent concerner l'aménagement du territoire et l'urbanisation (habitat résidentiel ou collectif ; économie tertiaire ou industrielle ; agriculture, élevage, culture, forêt), la réglementation (coefficient d'occupation des sols ; type de chauffage ; normes énergétiques ; production d'énergie ; espace naturel protégé, agriculture intensive ou extensive), ou encore les investissements en équipements publics (transports ; production d'énergie ; logements sociaux ; traitement des déchets). Une fois les choix d'aménagement réalisés par le biais d'une interface tactile, un dispositif scénographique permet alors de visualiser leurs impacts dans le présent et le futur.



Cette visualisation du territoire est alors rendue à l'horizon 2020 et 2050 au moyen d'écrans de données, sous forme de projections sur le dôme lui-même ainsi qu'au sol. Ces choix territoriaux sont également transposés à l'ensemble des communes de France, puis à l'échelle du monde, et visibles sur trois écrans différents. A l'issue de la simulation, des effets abstraits représentent également l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, la déplétion des énergies fossiles, l'augmentation de la population entre autres indicateurs. La première représentation a eu lieu à Valbonne du 10 au 19 mai 2013. Le dôme géodésique a accueilli entre 80 et 100 visiteurs par jour ; habitants et usagers de la commune et de la technopole de Sophia Antipolis, collégiens, lycéens et étudiants sont ainsi venus tester le jeu.

Pour réaliser ECOTYPE, qui a été labellisé PACA Labs<sup>55</sup>, le Hublot et Scen&Act ont mis en œuvre une collaboration inédite entre des partenaires locaux complémentaires. Tout d'abord Scen&Act est une société qui a été créée en 2000 et qui intervient dans l'aménagement du spectacle dans la cité alors que le Hublot est un centre de création multimédia favorisant l'accès à la culture par la sensibilisation et la formation de base aux NTIC, le développement d'usages et de contenus et le soutien aux projets locaux. Ces deux structures culturelles sont par ailleurs des opérateurs technologiques innovants, tant dans les outils qu'elles développent que par leur volonté de créer des partenariats constructifs et originaux. J'ai participé à ce projet pour le CMA, assisté d'un élève du Mastère Spécialisé OSE (Stève

<sup>55</sup> PACA Labs est un appel à projets de la région PACA, en partenariat avec le FEDER, destiné à soutenir des expérimentations de projets d'innovation numérique sur les territoires, en lien avec les usagers. ECOTYPE a été sélectionné par les experts du dispositif PACA Labs pour la réalisation d'un prototype au service des territoires et de leurs habitants.

Lechevalier) que j'ai supervisé dans cette mission. Dans le cadre de ce projet, nous avons développé le noyau du moteur de l'outil logiciel spécifique à ECOTYPE, dédié à l'analyse des enjeux Energie-climat-aménagement du territoire, applicable à toute commune en France. Il s'agissait de déterminer les algorithmes de calcul qui s'intègrent dans un modèle générique implémentant les questions de l'aménagement des sols, de l'évolution du territoire et de substitution énergétique subséquentes à des ambitions de développement durable. Ainsi, nous avons développé un modèle prospectif simplifié représentant les tendances d'évolution des systèmes territoriaux au vue de l'occupation des sols, de la démographie, des questions énergétiques et environnementales, et leurs extrapolations à l'échelle nationale et mondiale.

La commune de Valbonne Sophia Antipolis fut un des partenaires du projet en étant le territoire de la première expérimentation. SOLAR GAMES, jeune entreprise innovante spécialisée dans le serious game et éditeur d'applications multimédias, a été chargée du développement de l'interface et du logiciel. Le LTCI Telecom ParisTech / CNRS UMR 5141, Laboratoire Traitement et Communication de l'Information, a été chargé de l'analyse des usages, des interactions avec le public et de l'appropriation du jeu. Ainsi, le travail de Marc RELIEU sur le retour d'usage et l'amélioration de la conception des interfaces, par le biais notamment de temps de rencontres avec le public, a permis d'affiner le modèle de jeu. Le BIAPI, Collectif transdisciplinaire de chercheurs rassemblés autour de la question environnementale (cadre de vie, espace public, nature, culture), a été chargé de la réalisation du dôme accueillant ECOTYPE. Enfin, Polytech'Nice (Université de Nice Sophia Antipolis), à travers son Master MAPI « Management de Projets Innovants » et le parcours spécialisé MAJE « Management de projets innovants en jeu vidéo », a contribué au développement du jeu. A noter qu'outre le PACA Labs, ECOTYPE a été soutenu par le PRIDES ICI<sup>56</sup> dont l'objectif est de soutenir l'innovation dans le champ de l'économie créative selon les axes « ville numérique et territoire communicant » et « Art, culture et territoire innovant ».

Le coût prévisionnel global du projet était de 339 811 euros, dont 35 999,04 euros affectés au CMA.

## **B. Les projets soumis mais rejetés**

### **1. 2016 – Projet G-TlalocME<sup>57</sup>: Geo-ThermaL Cooperation Mexico-Europe**

Projet européen Horizon 2020 – Secure, Clean and Efficient Energy – Competitive Low-carbon energy - LCE 23: International Cooperation with Mexico on geothermal energy

Appel conjoint du Programme H2020 et de CONACYT-SENER (fonds sectoriel du Conseil national de la Science et de la Technologie mexicain et du Secrétariat à l'Energie)-

Laboratoire porteur : Coordinateur Europe : Fraunhofer (Allemagne) ; coordinateur Mexique : UGTO, Universidad de Guanajuato (Mexique)

---

<sup>56</sup> Pôle Régional d'Innovation et de Développement Economique Solidaire (PRIDES) – Industries de la Créativité et Innovation (ICI). Le PRIDES ICI travaille dans le domaine de l'économie créative, axe 2 de la politique de développement économique de la Région PACA. Son action tourne autour de 2 axes : Ville numérique et Territoire communicant et Art, culture et territoire innovant.

<sup>57</sup> Pour information, Tlaloc était une divinité dans la religion aztèque, le dieu suprême des pluies, le dieu de la fertilité et de l'eau, et le donateur de vie. Lui, dont le nom est souvent traduit par «chemin sous la terre» était un dieu associé aux grottes, aux sources et à la montagne. De nos jours, il aurait été le dieu de l'énergie venant de la terre, de l'énergie géothermique.

Partenaires : Europe : Université de Nottingham (UNOTT, Royaume-Uni), CIEMAT (Espagne), CMA (MINES ParisTech/ARMINES, France), Research Studios Austria (RSA, Autriche), Vysoka Skola Banska (Technicka Univerzita Ostrava (République Tchèque), Geothermal Express (Hongrie), FITE (République Tchèque), Schlumberger Oilfield (Royaume Uni), GreenDelta (Allemagne), Fundacion CIRCE (Centro de Investigacion de Recursos y Consumos Energeticos (Espagne) ;

Mexique : Operadora, Energías Alternas Estudios y Proyectos (ENAL), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM-CIICAp), Centro de Analisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable (CADIS), Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Centro De Investigación Y Desarrollo Tecnológico En Electroquímica, S.C. (CIDETEQ), Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), Sustentabilidad Energética Mexicana S de RL de CV (SEM), Universidad nacional autonoma de Mexico (UNAM).

Chercheurs participants : CMA : Sandrine Selosse, Edi Assoumou et Nadia Maïzi

Financement : Commission européenne

Rôle : coordinatrice du projet pour le CMA, participation à la rédaction de la proposition, responsable du programme de recherche CMA. Le CMA est leader de la Task 7.1. Modélisation d'un système énergétique intégré.

Objectif du projet : Regroupant géologues, ingénieurs, chimistes, économistes, avocats, sociologues, philosophes et politologues de grandes institutions en provenance d'Allemagne, du Royaume-Uni, de l'Espagne, de France, d'Autriche, de République tchèque, de Hongrie et du Mexique, le projet vise à tester, développer et transférer de nouvelles technologies, des expériences et méthodologies relatives aux systèmes géothermiques avec notamment un projet de démonstration à Acoculco au Mexique. G-TlalocME vise à contribuer de manière substantielle au développement et à l'amélioration des politiques sur la géothermie et des conditions technologiques ; l'approche interdisciplinaire permettant une vision plus intégrée de la géothermie, en incluant ses risques technologiques et sociaux. G-TlalocME répondant à l'appel conjoint du Programme Horizon 2020 et du CONACYT-SENER, le projet vise à renforcer la coopération sur la science et la technologie entre l'Europe et le Mexique.

Programme de recherche (CMA) : La contribution du CMA intervient essentiellement dans le work package 7. « Social, Economic and Environmental Impacts of Geothermal Energy » coordonné par le CIEMAT (Espagne) en collaboration avec RSA (Autriche), GeoExpress (Hongrie), GDG (Allemagne) et CIRCE (Espagne).

- ✓ Modélisation du système énergétique mexicain sous TIMES (Task 7.1)
- ✓ Implémentation de scénarios long terme sur le potentiel de déploiement de la géothermie (Task 7.1)
- ✓ Analyse des impacts socio-économiques et environnementaux des scénarios énergétiques produits dans la « Task 7.1 » (Task 7.2)

Livrables (CMA) :

- ✓ Organisation du premier workshop du projet sur « Methods, Modelling, Tools » en janvier 2017 à MINES ParisTech, Paris, dont l'objectif est de discuter, d'innover et de finaliser les

méthodes et les outils qui seront utilisés tout au long du projet. Cela comprend les divers logiciels, les outils et approches à appliquer dans le projet afin de modéliser le système énergétique mexicain avec des perspectives nationale et régionale. (Participation aux autres workshops et réunions du projet).

- ✓ 2 papiers académiques portant sur le système énergétique mexicain et le potentiel de développement de la géothermie
- ✓ Contribuer à la fourniture de données des différentes Tasks du WP.
- ✓ Participation à la rédaction des rapports, des autres papiers et du plan Stratégique du WP 7.

Durée du projet : 4 ans (participation CMA à la Task 7.1 : 14 mois)

Coût total du programme : 9 996 991,25 euros (pour le consortium Europe) dont 2 550 582,50 euros pour le CMA

Encadrement : ce projet prévoyait l'accueil d'un post-doctorant ou d'un stagiaire Mastère spécialisé OSE supervisé par le CMA (Sandrine Selosse).

## **2. 2015 – Projet OSS 974 : Optimisation des Systèmes énergétiques Soutenables : Vers l'autonomie énergétique de l'île de La Réunion**

Appel à projet Recherche du Ministère des Outre-Mer – 2015 sur le thème du changement climatique et de ses conséquences.

Laboratoire porteur : le CEMOI de l'Université de la Réunion

Partenaires : le laboratoire PIMENT (Physique et Ingénierie mathématique pour l'énergie et l'environnement) de l'Université de la Réunion et le CMA de MINES ParisTech

Chercheurs participants : CMA : Sandrine Selosse ; CEMOI : Olivia Ricci et Sabine Garabedian ; PIMENT : Fiona Bernard-Sora et Jean Philippe Praene

Financement : Ministère des Outre-Mer

Rôle : coordinatrice du projet pour le CMA, participation à la rédaction de la proposition, responsable du programme de recherche CMA

Objectif du projet : définir une feuille de route pour planifier la transition énergétique que l'île de la Réunion vers une autonomie en 2030 en conduisant une évaluation prospective technique, économique et environnementale de l'autonomie énergétique.

Programme de recherche (CMA) : Développement de TIMES-Réunion et conduite d'une analyse technico-économique de l'autonomie énergétique de l'île de la Réunion :

- ✓ Mise à jour de la base de données du modèle TIMES-Réunion
- ✓ Développement des différentes sources d'énergie renouvelable
- ✓ Modélisation des émissions de GES
- ✓ Implémentation du secteur des transports
- ✓ Analyse technico-économique de l'autonomie énergétique

Livrables (CMA) :

- ✓ Etude technico-économique de l'autonomie énergétique à 2030 à l'aide du modèle TIMES-Réunion
- ✓ Publication sur la faisabilité technique et économique de l'autonomie énergétique en 2030
- ✓ Présentation des résultats de l'étude lors d'une conférence nationale ou internationale

Durée du projet : 2 ans (participation CMA 2 ans)

Coût total du programme : 161 638.98 euros dont 50 414 euros pour le CMA

### **3. 2014 – Projet PIVERT : La Politique Industrielle Verte dans l'Arène Commerciale Internationale**

Projet ANR, Défi 1 Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique – 2015 – PRC (Projet de recherche collaborative)

Laboratoire porteur : GREDEG, Université de Nice Sophia Antipolis et CNRS

Partenaires : l'OFCE – Sciences Po et le CMA de MINES ParisTech

Chercheurs participants : CMA : Sandrine Selosse et Hélène Le Cadre ; GREDEG : Christophe Charlier, Patrice Bougette, Frédéric Marty, Raphaël Chiappini et Aymeric Lardon ; OFCE : Sarah Guillou

Financement : Agence Nationale de la Recherche

Rôle : coordinatrice du projet pour le CMA, participation à la rédaction de la proposition, responsable du programme de recherche CMA

Objectif du projet : explorer la faisabilité de politiques industrielles vertes dans le domaine du commerce international suivant les points de vue théorique et empirique en analysant les conséquences des politiques industrielles vertes sur la concurrence internationale, sur l'environnement et la transition énergétique, ainsi que sur le bien-être (en tenant compte du fait que ce genre de politique a besoin de financements publics pour être mise en œuvre)

Programme de recherche (CMA) : Participation à l'analyse de l'impact de la politique industrielle verte sur les décisions d'investissements et la compétitivité des entreprises pour comprendre le rôle des changements dans les règles publiques de promotion de la croissance verte pour inciter à l'investissement ; Etudes des résultats d'analyses économétriques (WP2) ; Elaboration de scénario futurs et analyse des scénarios passés et futurs pour évaluer les conséquences de tout changement de politiques vertes (renforcement ou affaiblissement) sur l'industrie et la production d'énergie renouvelable (WP3). Le CMA s'engageait à la rédaction de 4 papiers et à la participation à 8 colloques en 2 ans.

Durée du projet : 2 ans (participation CMA 2 ans)

Coût total du programme : 193 000 euros dont 67 613 euros pour le CMA

Encadrement : ce projet prévoyait l'accueil d'un stagiaire Mastère spécialisé OSE supervisé par le CMA (Sandrine Selosse et Hélène Le Cadre) et d'un stagiaire PolyTech'Nice supervisé par le CMA (Sandrine Selosse et Hélène Le Cadre).

#### **4. 2014 – Projet OSS 974 : Optimisation des Systèmes énergétiques Soutenables : Vers l'autonomie énergétique de l'île de La Réunion**

Projet ANR, Défi 2 Energie propre, sûre et efficace – 2015 – PRC (Projet de recherche collaborative)

Laboratoire porteur : le CEMOI de l'Université de la Réunion

Partenaires : l'OSU-R (Observatoire des sciences de l'univers à la Réunion ; Océanographie physique) de l'Université de la Réunion, l'Université de Laval Québec (Economie) et le CMA de MINES ParisTech

Chercheurs participants : CMA : Sandrine Selosse ; CEMOI : Olivia Ricci et Sabine Garabedian ; OSU-R : Emmanuel Cordier ; Université de Laval : Bernard Decaluwé

Financement : Agence Nationale de la Recherche

Rôle : coordinatrice du projet pour le CMA, participation à la rédaction de la proposition, responsable du programme de recherche CMA

Objectif du projet : Développer des modèles long terme énergie-économie tenant compte du comportement des acteurs, des caractéristiques des technologies et des spécificités locales

Programme de recherche (CMA) : Participation au développement de ExteRun (WP1), développement de TIMES-Réunion (WP2), couplage TIMES-Réunion/ExteRun (WP3) et analyse de scénarios prospectifs du système énergétique de la Réunion en 2030 (WP4) :

- ✓ Développement du secteur énergétique dans ExteRun et des émissions associées de GES
- ✓ Mise à jour de la base de données du modèle TIMES-Réunion
- ✓ Développement des différentes sources d'énergies marines
- ✓ Implémentation du secteur des transports
- ✓ Couplage ExteRun et TIMES-Réunion
- ✓ Analyse prospective du système énergétique de l'Île de la Réunion

Durée du projet : 2 ans (participation CMA 2 ans)

Coût total du programme : 136 817 euros dont 47 892 euros pour le CMA

Encadrement : ce projet prévoyait l'embauche d'un post-doctorant co-encadré par le CMA (Sandrine Selosse) et le CEMOI (Olivia Ricci et Sabine Garabedian), et l'accueil d'un stagiaire Mastère spécialisé OSE supervisé par le CMA (Sandrine Selosse).

#### **5. 2013 – Evaluation of Bioenergies with Carbon Capture and Storage (BECCS) potential using the integrated energy and economic model TIAM-FR**

Global Climate and Energy Project (GCEP), Stanford University : Net Negative Carbon Emissions in Energy Supply

Laboratoire porteur : CMA de MINES ParisTech

Chercheuses participantes : CMA : Sandrine Selosse et Olivia Ricci

Financement : GCEP

Rôle : porteuse et coordinatrice du projet, co-rédaction de la proposition, responsable du programme de recherche

Objectif du projet : Analyse intégrée du potentiel de développement de la bioénergie avec capture et séquestration du carbone (CSC) à l'échelle mondiale et régionale

Programme de recherche Analyser le potentiel d'émissions négatives de carbone de différents systèmes énergétiques intégrant des technologies existantes et futures de capture des émissions de CO<sub>2</sub>, des technologies de transport du CO<sub>2</sub>, des procédés de valorisation industrielle du carbone et des scénarios contrastés concernant les potentiels de stockage des sites onshore et offshore, mise en perspective par les besoins en eau de la filière et les échanges en bioénergies.

- ✓ Evaluation des capacités de stockage du CO<sub>2</sub>
- ✓ Evaluation du marché de la biomasse
- ✓ Evaluation des besoins en eau de la bioénergie avec CSC
- ✓ Développement des filières biocarburants
- ✓ Création d'une chaîne de valorisation industrielle du CO<sub>2</sub> et de production de microalgues

Durée du projet : 3 ans

Coût total du programme : 801 363 dollars

Encadrement : ce projet prévoyait l'embauche d'un doctorant encadré par le CMA (Sandrine Selosse) et l'accueil de deux stagiaires Mastère spécialisé OSE supervisés par le CMA (Sandrine Selosse et Olivia Ricci).

## **6. 2013 – Projet AGIR : La transition énergétique, nouvel enjeu industriel et commercial**

ENRS Projets exploratoires, Défi Transition énergétique : Ressources, Société, Environnement

Laboratoire porteur : GREDEG, Université de Nice Sophia Antipolis et CNRS

Partenaires : l'OFCE – DRIC et le CMA de MINES ParisTech

Chercheurs participants : CMA : Sandrine Selosse, Nadia Maïzi et Hélène Le Cadre ; GREDEG : Christophe Charlier, Frédéric Marty, Patrice Bougette, Patrice Reis et Sarah Marguerite ; OFCE : Sarah Guillou

Financement : CNRS

Rôle : coordinatrice du projet pour le CMA, participation à la rédaction de la proposition, responsable du programme de recherche CMA

Objectif du projet : cerner comment l'OMC traite des différends commerciaux de la transition énergétique et analyser les caractéristiques importantes du raisonnement juridique et économique mobilisé afin de pouvoir dessiner les propriétés d'une politique industrielle au service de la transition énergétique acceptable dans le forum international

Programme de recherche (CMA) : Analyse des politiques industrielles au service de la transition énergétique

- ✓ Mise en cohérence des choix technologiques assurant une transition énergétique avec les politiques industrielles

Durée du projet : 1 an

Coût total du programme : 14 950 euros dont 3 750 euros.

## **7. 2013 – A network to improve the transparency and understanding of energy system models**

COST Action (European CO-operation in Science and Technology) – Domain: Earth System Science and Environment Management

Laboratoire porteur : CIEMAT, Espagne

Partenaires : CMA (France), DTU (Danemark), ECN (Pays-Bas), IER (Allemagne), IFE (Norvège), JRC (Commission européenne), UCL (Royaume-Uni), VITO (Belgique), VTT (Finlande)

Chercheurs participants : CMA : Sandrine Selosse, CIEMAT : Helena Cabal ; DTU : Kenneth Karlsson ; ECN : Tom Kober ; IER : Markus Blesl ; IFE : Pernille Seljom ; JRC : Wouter Nijs ; UCL : Gabriel Anandarajah ; VITO : Pieter Lodewijks ; VTT : Antti Lehtila

Financement : Commission européenne

Rôle : Coordinatrice et contributrice (côté CMA), participation à la rédaction de la proposition

Objectif du projet : Créer un réseau de partage de bonnes pratiques permettant de mieux coordonner le développement futur du modèle TIAM et améliorer la transparence et la compréhension des modèles existants entre les chercheurs et les décideurs publics.

Contribution du CMA : suivant cet objectif, une série de modèles sera caractérisé, comparé et présenté au cours de huit workshops qui seront ouverts aux équipes de modélisation et aux intervenants externes. Des publications tant académiques qu'à orientation politique seront produites. En plus de la participation à ces workshops, et de l'organisation de l'un d'entre eux, le CMA s'était notamment engagé sur les tâches suivantes (sachant qu'une participation de tous à l'ensemble des tâches étaient attendues) :

- ✓ Task 1.1. Développement et maintien des modèles d'échanges de données (CIEMAT, CMA, ECN).
- ✓ Task 1.2. Caractérisation du design et des données d'entrées des modèles associés aux workshops (CMA).

- ✓ Task 2.3. Comparaison des données de sortie des modèles issues d'une série de scénarios définis et compréhension des différences (CMA).
- ✓ Task 3.1. Rapport de recherche des tâches précédentes (CMA, ECN).

Durée du projet : 4 ans (2014-2018)

Coût total du programme : 61 000 euros.

## **8. 2012 – Platform for coordinated networking for ETSAP-TIAM energy system model**

COST Action (European CO-operation in Science and Technology) – Domain: Earth System Science and Environment Management

Laboratoire porteur : CIEMAT, Espagne

Partenaires : CMA (France), DTU (Danemark), ECN (Pays-Bas), IER (Allemagne), IFE (Norvège), JRC (Commission européenne), UCL (Royaume-Uni), VITO (Belgique), VTT (Finlande)

Chercheurs participants : CMA : Sandrine Selosse, CIEMAT : Helena Cabal ; DTU : Kenneth Karlsson et Poul Erik Grohnheit ; ECN : Tom Kober ; IER : Markus Blesl ; IFE : Eva Rosenberg ; JRC : Sofia Simoes ; UCL : Gabriel Anandarajah ; VITO : Pieter Lodewijks ; VTT : Antti Lehtila

Financement : Commission européenne

Rôle : Coordinatrice et contributrice (côté CMA), participation à la rédaction de la proposition

Objectif du projet : Créer et maintenir une plateforme d'échanges de connaissances sur les modèles de systèmes énergétiques, principalement orientée sur ETSAP-TIAM ; accroître les activités de réseaux des partenaires du projet, que ce soit entre eux ou avec des acteurs externes intéressés par ce type d'analyses long terme ; promouvoir la coopération d'équipes multidisciplinaires ; soutenir les développements et les mises à jour du modèle ETSAP-TIAM.

Contribution du CMA : Participation et interventions aux workshops de la plateforme, organisation de certains de ces workshops ; échanges de données entre les partenaires du projet ; montage de projets

Durée du projet : 3 ans (2013-2016)

Coût total du programme : 68 000 euros.

## **C. RAYONNEMENT ET ACTIVITES SCIENTIFIQUES**

Dans cette section sont déclinées les différentes activités que je mène pour soutenir et accompagner mon travail de recherche. Ces activités sont de formes diverses et comprennent, outre la rédaction d'articles et la participation aux conférences recensées précédemment, l'organisation d'évènements, l'association à des communautés scientifiques, la participation à des comités d'experts et à des comités de lecture de journaux internationaux ainsi que la vulgarisation scientifique.

## **1. Organisation de conférences**

### **a. Chaire Modélisation prospective au service du développement durable**

La Chaire Modélisation prospective au service du développement durable, de par son objectif de constituer un lieu d'échanges et de débats sur les questions Energie-Climat, s'est donnée un rôle d'animation scientifique autour des questions prospectives qui se décline en différents types de manifestations. J'ai la charge d'organiser les divers événements de la Chaire MPDD.

#### **Les journées de la Chaire Modélisation prospective : Prospective pour les enjeux Energie-Climat**

Ces journées ont pour vocation de faire un point sur l'activité de la Chaire et d'apporter un contact direct entre les entreprises partenaires, les chercheurs mobilisés et les participants qu'ils soient académiques, institutionnels ou industriels. Ces journées proposent traditionnellement le matin une session dédiée à la présentation des chercheurs des laboratoires fondateurs de la Chaire (CMA et CIRED), la priorité étant donnée aux doctorants. La session de l'après-midi est consacrée à traiter un sujet d'actualité. Des intervenants extérieurs sont alors invités à s'exprimer sur le thème proposé. Ces Journées de la Chaire sont organisées alternativement à MINES ParisTech (Paris) et à Pont ParisTech et rassemblent habituellement une centaine de participants.

- Organisation des éditions 2008, 2010, 2012 et 2015 à MINES ParisTech, Paris
- Co-organisation des éditions 2009, 2011, 2014 et 2017 à Ecole des Ponts ParisTech, Paris

#### **Les journées de la Chaire Modélisation prospective – Partenaires**

Ces cycles de conférences intra-entreprises sont réservés aux cadres des entreprises partenaires sur des thèmes décidés en concertation avec les Partenaires. Ces séminaires se font généralement dans les locaux des entreprises partenaires à travers une formule d'invitations. Le thème de la conférence, animé par un ou deux experts, cible un niveau « général » de sensibilisation visant à convaincre de l'intérêt d'une approche prospective et un niveau « expert » répondant à une interrogation/problématique précise.

- Co-organisation des éditions 2010 (TOTAL : Décisions politiques et économiques face aux enjeux énergie-climat), 2012 (Schneider Electric : Smart cities et prospective : une contribution à RIO+20), 2013 (ADEME : La transition énergétique au prisme des scénarios de prospective) et 2016 (EDF : Du bon usage des modèles et des scénarios ; et GRTgaz : L'énergie et l'évolution de nos modes de vie. Les apports d'une démarche prospective).

#### **Les journées de la Chaire Modélisation prospective – Mastère Spécialisé OSE**

Depuis 2015, la Chaire co-organise avec le Mastère Spécialisé OSE (Optimisation des Systèmes Energétiques) un événement où les élèves sont invités à restituer leur travail d'études de l'année portant sur le thème de travaux définis pour la promotion. La matinée est ainsi dédiée à la présentation des travaux des élèves, avec la participation des partenaires de la Chaire clôturant la session par une table ronde. L'après-midi est dédiée aux interventions des spécialistes du domaine, qu'ils soient académiques, institutionnels ou industriels.

- Co-organisation de l'édition 2016 : Les micro-grids. Pourquoi ? Pour qui ?
- Co-organisation de l'édition 2017 : La valorisation des déchets

## **Les séminaires de la Plateforme de Modélisation prospective de la Chaire MPDD**

Depuis son renouvellement, la Chaire Modélisation prospective a mis en place un cycle de séminaires et d'ateliers méthodologiques dans le cadre d'une plateforme de modélisation. Cette plateforme vise à permettre les échanges et la confrontation entre équipes de modélisation, administrations et partenaires de la Chaire autour d'éclairages que la modélisation prospective peut apporter sur les politiques publiques liées à la transition énergétique en France.

- Co-organisation du Séminaire sur les Enjeux clefs pour la modélisation de la transition bas carbone du 13 mai 2016 portant sur les « Dimensions technico-économiques de la transition : scénarios pour l'intégration du renouvelable ».

## **Les évènements Presse de la Chaire Modélisation prospective**

- Co-organisation :
  - Petit-déjeuner Presse à l'occasion du renouvellement de la Chaire Modélisation prospective, février 2015, MINES ParisTech, Paris
  - Rencontre Presse à l'occasion de la COP 21, juillet 2015, MINES ParisTech, Paris
  - Conférence « Innovations in Decarbonisation » organisée par Nadia Maïzi (MINES ParisTech, CMA) et Paul Wright (BECI, UC Berkeley), dans le cadre de « Our Common Future Under Climate Change », labellisé COP 21, 10 juillet 2015, MINES ParisTech, Paris

## **b. Conférences sur les Changements Climatiques des Nations Unies (UNFCCC)**

En tant que membre de la délégation ParisTech dans le cadre des Conférences des Nations Unies sur les changements climatiques (COP), je participe à l'organisation des évènements dont nos appels à proposition ont été acceptés. Ces conférences sont alors organisées en zone bleue (zone où des accréditations sont nécessaires), dans les enceintes des Nations Unies ou dans les différents pavillons régionaux (européen, africain, etc.). D'autres évènements peuvent également être organisés en zone « ouverte », comme ce fut le cas pour les Espaces Génération Climat lors de la Conférence des Parties qui a eu lieu à Paris en décembre 2015 (COP 21).

- Co-organisation des éditions :
  - COP 15 à Copenhague en 2009, enceinte UNFCCC : Beyond the financial crisis : Regional energy policy and global carbon constraints
  - COP 17 à Durban en 2011, enceinte ICC (International Chamber of Commerce) : Long-term prospective of business contribution to low carbon development et Pavillon africain : Low carbon development and energy access in Africa
  - COP 18 à Doha en 2012, Pavillon européen : Smart and sustainable low carbon growth of electricity system
  - COP 19 à Varsovie en 2013, enceinte UNFCCC : Combating climate change with or without nuclear power et Pavillon européen : The challenges of applying intelligent solution in the energy and climate revolution
  - COP 20 à Lima en 2014, enceinte UNFCCC : Combating climate change in Latin America et Pavillon européen : Carbon energy system analysis through the regional climate contribution's issues et The need and challenge of ambitious climate-energy strategies at the urban scale
  - COP 21 à Paris en 2015, Espaces Générations Climat : Les contributions industrielles aux stratégies long terme de décarbonation, sous le parrainage de Ségolène ROYAL, Ministre de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie et animé par Hervé GARDETTE de France Culture.

- COP 22 à Marrakech en 2016, enceinte UNFCCC : Combating climate change in Mediterranean and African countries and in the Middle East

### **c. European Conference on Operational Research (EURO)**

Dans le stream Long Term Planning in Energy, Environment and Climate dirigé par Nadia MAÏZI, j'organiser pour chaque édition, des sessions sur un thème de mon choix à la conférence EURO. Ainsi, j'ai pu organiser cinq sessions depuis 2010.

- Organisation :
  - Session « Post-Paris Climate Policy », EURO XXVIII, Poznan, Pologne, juillet 2016
  - Session « Challenges for a future low carbon energy system », EURO XXVII, Glasgow, Ecosse, juillet 2015
  - Session « Solutions for energy transition », EURO XXVI, Rome, Italie, juillet 2013
  - Session « Pathways toward low carbon transport », EURO XXV, Vilnius, Lituanie, juillet 2012
  - Session « Meeting the targets : policy and measures », EURO XXIV, Lisbonne, Portugal, juillet 2010

### **d. Les workshops de l'ETSAP**

L'ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program), un programme sous l'égide de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) organise, deux fois par an, un workshop de deux ou trois jours. Lors de ces workshops, les membres de la communauté ETSAP peuvent échanger sur leurs expériences et discuter des moyens d'améliorer les outils et de gérer des activités communes. Les experts locaux sont également invités à ces workshops afin de présenter leurs méthodologies, leurs outils et peuvent ainsi interagir avec les participants ETSAP de leur pays.

- Co-organisation de deux workshops :
  - 15-17 décembre 2008 à MINES ParisTech, Sophia Antipolis
  - 22-23 octobre 2015 à MINES ParisTech, Sophia Antipolis

Au sein de l'ETSAP, s'est constitué un consortium autour du développement collaboratif d'un de ses modèles, le modèle mondial ETSAP-TIAM. Des workshops dédiés ont ainsi été organisés afin de travailler au développement du modèle.

- Organisation d'un workshop sur ETSAP-TIAM :
  - 15 février 2012, à MINES ParisTech, Sophia Antipolis

## **2. Membres d'associations et de communautés scientifiques**

Comme présenté plus en détail précédemment, je suis membre associé du GREDEG (Groupe de Recherche en Droit, Economie, Gestion), UMR 7321, CNRS et Université de Nice Sophia Antipolis, membre de la communauté ETSAP (Technology Systems Analysis Program) de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) et membre du consortium ETSAP-TIAM. Ces associations scientifiques sont structurantes dans la manière dont je mène ma recherche via la mise en place de collaborations et la recherche de divers financements de recherche collaborative.

Par ailleurs, je suis également membre de l'Association Internationale des Economistes de l'Energie (IAEE) et de l'Association Technique Energie Environnement (ATEE).

Enfin, je suis membre de la délégation ParisTech pour les « Conference Of Parties » (COP) sur le changement climatique (UNFCCC) depuis 2009 (COP15 Copenhague). J'ai d'ailleurs initialement travaillé au dossier d'accréditation de ParisTech auprès de l'UNFCCC comme organisation observatrice. Depuis, je m'occupe chaque année de la logistique d'accréditation des membres de la délégation ParisTech et des soumissions de projets d'organisation d'évènements (side events) et de tenue d'un stand ParisTech. Ce stand vise à communiquer auprès de la scène internationale en lien avec les négociations climatiques sur nos activités (CMA, MINES ParisTech et Chaire Modélisation prospective au service du développement durable). En 2016, je me suis chargée du dossier d'accréditation de MINES ParisTech en tant qu'organisation observatrice auprès des Nations Unies lors des Conférences sur les Changements Climatiques.

### **3. Participation à des comités de lecture de journaux scientifiques internationaux**

Outre l'édition des working papers de la Chaire dont je m'occupe, je peux également être sollicitée pour des relectures d'articles par des revues internationales. Ainsi, j'ai « révisé » des articles pour les revues suivantes :

- Energy policy, depuis 2012
- Energy Economics, depuis 2014
- Economics Bulletin, depuis 2014
- Journal of Cleaner production, depuis 2014
- Energies, depuis 2015

### **4. Participation à des comités d'experts nationaux**

De mai 2012 à mai 2013, j'ai participé à un Groupe de Concertation Transversal « International » (GCTI) mis en place par le Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche et associant les ministères, les agences, les alliances, les organismes de recherche, la Conférence des Présidents d'Université, la Conférence des Directeurs d'Ecoles Françaises d'Ingénieurs et les pôles de compétitivité. Après avoir conduit deux projets visant à définir la stratégie de coopération scientifique et technologique avec la Chine et l'Inde et menant celui avec les pays développés d'Asie (Japon, Corée, Taïwan, Singapour), un quatrième consacré au « Brésil » a été lancé sur cette période. L'objectif de ce groupe était dans un premier temps de réaliser un état des lieux de la recherche au Brésil et de la coopération entre la France et ce dernier, et, dans un second temps, la rédaction d'un Plan d'orientation stratégique pour développer la coopération scientifique et technologique entre la France et le Brésil (incluant des recommandations transversales et thématiques). Au sein du groupe « Brésil », j'ai travaillé plus spécifiquement dans l'atelier « Energie » sous la responsabilité du Département des affaires européennes et internationales (DAEI). Des fiches thématiques ont également été rédigées et annexées au POS présentant les enjeux scientifiques et technologiques, socioéconomiques, éthiques de la recherche pour la France ou le Brésil et des analyses SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) dans chacune des thématiques retenues. J'ai principalement travaillé sur les fiches « Prospective » et « Ville durable ». Ainsi, ce travail a permis d'identifier des domaines de recherche pour lesquels un renforcement des collaborations serait mutuellement bénéfique et s'appuierait sur les

compétences complémentaires d'équipes de recherche reconnues internationalement afin de faire face aux grands défis mondiaux.

## **5. Séjours invités au sein de laboratoires de recherche**

A deux reprises, j'ai été invitée à séjourner au Centre d'Economie et de Management de l'Océan Indien (CEMOI) de l'Université de la Réunion.

Mon premier séjour, de dix jours, en novembre 2009, a, entre autres, été l'occasion de discuter d'axes éventuels de collaboration, en particulier avec Sabine Garabedian, Maître de Conférences au CEMOI.

Mon second séjour, d'une durée d'une semaine, en décembre 2013, a permis de mettre en œuvre un plan de travail collaboratif axé sur le couplage de nos modèles respectifs. En collaboration avec Sabine Garabedian et Olivia Ricci, également Maître de Conférences au CEMOI, nous avons, à l'issue de cet échange, répondu à deux appels à projet (2014 et 2015), présenté un papier commun dans une conférence internationale (International Conference on Economics Modeling) en 2014 et soumis ensemble un article dans la revue *Renewable & Sustainable Energy Review* en 2016.

## **6. Participation à des actions nationales de dissémination et vulgarisation scientifiques**

### **a. Le programme MEDITES**

En octobre 2016, je suis entrée dans le programme MEDITES en tant que référente scientifique intervenant dans le parcours « le changement climatique vu au travers de ses impacts ».

Plus précisément, MEDITES<sup>58</sup> est un projet de structuration et d'innovation territoriales pour le développement de la culture scientifique et technique et pour l'égalité des chances. Le projet est financé par l'Etat au titre des projets d'investissements d'avenir. Le projet MEDITES, porté par l'Université Nice Sophia Antipolis, fédère les nombreux acteurs, institutionnels ou associatifs, de la culture scientifique des Alpes-Maritimes et du Var en les associant avec les laboratoires de recherche garantissent la qualité scientifique des projets de parcours pédagogiques proposés. L'objectif principal de MEDITES est de donner aux jeunes un accès à la culture scientifique, éveiller la curiosité et l'esprit critique, y compris et surtout de ceux qui se trouvent socialement et territorialement les plus éloignés de cette culture. Pour cela, des parcours pédagogiques sont mis en place en concertation avec les équipes pédagogiques des différents établissements. Plusieurs grandes thématiques sont proposées (Biodiversité ; Temps, Histoire, Evolution ; Vivant, Matière, Technologie ; Sciences du numérique ; Terre, Océan, Univers) et les activités se déroulent tout au long de l'année scolaire selon une méthodologie rigoureuse. Le projet MEDITES se déroule sur trois années scolaires, l'année scolaire 2016-2017 correspondant à la 3<sup>ème</sup> année, et cible majoritairement les collégiens du niveau de 5<sup>ème</sup>. Ce programme est organisé sous la forme de parcours comprenant dix séances de deux heures (réalisées au sein de l'établissement scolaire sauf 1 intervention effectuée en extérieur) réparties pendant l'année scolaire et réalisées par trois structures différentes dont au moins un laboratoire de recherche. A l'issue de ces interventions et au cours du mois de mai, les élèves présentent, au parc de Valrose de l'Université de Nice Sophia Antipolis, le résultat de leurs découvertes sous la forme d'ateliers inter actifs.

---

<sup>58</sup> <http://medites.fr/>

Coordonné par l'association Planète Sciences Méditerranée<sup>59</sup>, le parcours sur « le changement climatique vu au travers de ses impacts », implique deux autres structures : le Centre de Découverte du Monde Marin et un laboratoire de recherche (en 2014-2015, il s'agissait de l'UMR espace, M. Pierre Carrega et en 2015-2016, du laboratoire de chimie, Mme Nathalie Sauret). Il comprend dix interventions organisées en 3 grandes parties :

- Causes naturelles et anthropiques du changement climatique ;
- Conséquence du changement climatique avec, notamment, mise en place d'un « observatoire des saisons » avec plantations d'arbustes permettant de suivre l'évolution de leur phénologie dans le temps ;
- Stratégies mises en place au niveau collectif (adaptations, atténuation...) et comportements individuels permettant de limiter les émissions de gaz à effet de serre ou les conséquences du changement climatique.

A travers ce parcours, nous devons intervenir au cours de 2 séances de 2 heures auprès dans chacun des quatre établissements participants.

## **b. La Fête de la Science**

Après une participation active aux **Fêtes de la Science** depuis 2011 au nom de MINES ParisTech<sup>60</sup>, je suis depuis 2016, membre du Comité Université de la Côte d'Azur pour l'organisation de la Fête de la Science dans les Alpes Maritimes. Dans ce comité, je représente MINES ParisTech et participe à la coordination et la mise en place de l'évènement dans le département en partenariat avec la délégation régionale.

En tant que porteur de projets, j'ai tenu différents stands pendant les **Week-end des Sciences**, au sein des différents **Villages des Sciences**, à Sophia Antipolis :

- 22 et 23 octobre 2016, Stand « A la découverte des énergies. Découvrir et comprendre en s'amusant le monde des énergies au regard de son évolution et de ses grands défis »
- 10 et 11 octobre 2015, Stand « Sur la route de la COP 21 – Paris Climat 2015 »
- 11 et 12 octobre 2014, Stand « Les énergies de demain : solutions pour grands défis »
- 12 et 13 octobre 2013, Stand « L'énergie aujourd'hui et demain », en partenariat avec Gridpocket
- 13 et 14 octobre 2012, Stand « Quelles énergies pour demain ? », en partenariat avec Gridpocket et l'ADEME
- 15 et 16 octobre 2011, Stand « développement durable », en partenariat avec le GREDEG (UMR 2371 - CNRS/UNS), l'ADEME et Aquassistance

L'objectif de ces stands est de sensibiliser les enfants comme les adultes aux problématiques énergétiques et du développement durable. Tout en évoquant les travaux de recherche menés au CMA et les partenariats que nous pouvons mettre en œuvre avec des entreprises dont les actions et innovations, in fine, impactent directement tout un chacun, l'enjeu est de créer des moments d'échanges sur ces grands défis mondiaux et de proposer des démonstrations, des jeux et/ou des quizz pour comprendre le système énergétique dans lequel nous vivons tout en s'amusant.

---

<sup>59</sup> <http://www.planete-sciences.org/mediterranee/>

<sup>60</sup> J'ai également participé à la Fête de la Science en 2008 et 2009 pour représenter le laboratoire GREDEG (Université de Nice Sophia Antipolis – CNRS) pendant ma période de thèse. Le village des Sciences se tenait alors uniquement au Campus Valrose à Nice de l'Université de Nice. En 2008, notre stand sur le développement durable était le seul représentant des Sciences Economiques et de Gestion et du Droit. Notre objectif était alors de démystifier ce domaine aux yeux du grand public et d'en faire découvrir les problématiques de recherche.

Toujours dans le cadre de la Fête de la science 2016, un collègue du CMA, Edi Assoumou, et moi-même avons proposé une intervention sur les énergies et le développement durable dans les établissements scolaires intéressés. Le public ciblé est large, primaire, collège et lycée. Un peu moins d'une trentaine d'enseignants se sont inscrits afin d'organiser une intervention auprès de leurs classes.

En matière de vulgarisation scientifique, je suis également intervenue au Collège Bertone à Antibes, auprès de classes de 3<sup>ème</sup> (36 élèves), le 1<sup>er</sup> février 2016. Mon intervention portait sur une « Sensibilisation aux enjeux climatiques. Décryptage de la COP 21 » et visait à présenter aux élèves les négociations internationales sur les changements climatiques ainsi que les enjeux relatifs à la COP 21 et à l'accord de Paris.

### **c. Les forums et salons du métier de chercheur à destination du grand public**

Le 22 novembre 2014, j'ai également participé à un stand sur « Les Métiers de la Science et de la Recherche » lors du **Carrefour des Métiers Post-Bac**, qui s'est tenu au Campus Saint-Jean d'Angely de l'Université de Nice Sophia Antipolis, à Nice.

Enfin, les 31 mai et 1<sup>er</sup> juin 2013, j'ai tenu un stand sur le thème de « Prospective, ville durable et véhicule électrique » lors du **Printemps des chercheurs**, à Nice. L'objectif de cet événement était de faire partager au grand public diverses problématiques de recherche scientifique.

## CHAPITRE 6 : ENCADREMENT D'ETUDIANTS

### A. ENCADREMENT DE DOCTORANTS

J'ai encadré deux doctorants en tant que maître de thèse depuis mon arrivée au Centre de Mathématiques Appliquées de MINES ParisTech. La directrice de thèse était Nadia Maïzi.

#### 1. Modélisation prospective TIMES pour l'Amérique du Sud

La première thèse a été menée et soutenue le 11 décembre 2015 par Sébastien Postic. Elle portait sur la Modélisation Prospective TIMES pour l'Amérique du Sud, avec une application aux négociations climatiques internationales. Ce travail a duré trois ans et a été réalisé en co-tutelle avec le Center for Mathematical Modeling (CMM) de La Universidad de Chile, sous la co-direction de Alejandro Jofré. Ce travail de recherche a conduit à plusieurs interventions lors de conférences internationales, à la publication de deux working papers dans Les Cahiers de la Chaire et à la rédaction de deux articles dont l'un a été publié en 2016 dans Energy Policy.

Sébastien Postic. Long-term energy prospective modeling for South America - Application to international climate negotiations. Environmental Engineering. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2015. English. [<NNT : 2015ENMP0048>](#). [<tel-01303955>](#)

#### Résumé de la thèse :

Avec un extraordinaire potentiel de production renouvelable, l'Amérique latine constitue un candidat idéal pour mener à bien une transition énergétique vers une société décarbonée qui pourrait en outre permettre une croissance économique socialement bénéfique dans un continent en développement rapide. Pourtant, préserver cette configuration vertueuse est un réel défi alors que plusieurs études soulignent que la région sera parmi les plus touchées par les effets du changement climatique. La matrice énergétique sud-américaine est en effet sensible à ces effets, à la fois sur l'amont de la chaîne – hydroélectricité, biomasse étant confrontées à des problèmes de soutenabilité – et sur l'aval avec l'augmentation des demandes, pour l'agriculture et l'air conditionné par exemple. En outre, les options de production éolienne, solaire et géothermique ne parviennent pas à s'affranchir du soutien des pouvoirs publics. Malgré ces problématiques et points forts partagés à l'échelle régionale, l'Amérique latine reste un continent hétérogène et fragmenté. Sa configuration physique limite l'intégration régionale, et l'héritage de deux siècles de guerre complique les relations politiques à l'échelon national. L'évolution historique de la région sud-américaine a entraîné de fortes disparités entre les secteurs énergétiques nationaux, et plusieurs tentatives de coopération sur des infrastructures transnationales se sont récemment soldées par de coûteux échecs. Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse était de développer un modèle mathématique adapté à l'étude des problématiques énergétiques régionales de long terme pour l'Amérique du Sud. Ce modèle, TIMES-América Latina y el Caribe (TIMES-ALyC) désagrégé en dix régions, a permis notamment d'étudier l'impact des politiques climatiques nationales pour le secteur énergétique régional, dans le contexte de la préparation de la conférence mondiale du climat de Paris, la COP 21, en décembre 2015. Ainsi, après un panorama historique de l'Amérique latine complété par une description de l'évolution historique du secteur énergétique sud-américain, de ses spécificités et défis actuels, en passant par une revue historique et un état de l'art de la prospective énergétique en Amérique du Sud, la problématique du changement climatique et ce qu'elle implique

pour l'Amérique du Sud a été étudiée et présentée dans ce travail de thèse. Il décrit également les négociations climatiques internationales, depuis leurs débuts en 1972 jusqu'aux propositions débattues en 2015 et fournit une analyse des impacts des contributions pour le secteur énergétique sud-américain, et inversement la contribution potentielle de ce secteur au vu des divers engagements climatiques nationaux. (Extrait adapté du résumé de thèse)

#### **Article publié dans une revue internationale**

POSTIC Sébastien, SELOSSE Sandrine and MAÏZI Nadia (2017), Energy contribution to Latin American NDCs: Analyzing sub-regional trends with a TIMES model, Energy Policy, Volume 101, February, pp. 170-184, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.023>

#### **Article soumis dans une revue internationale**

POSTIC Sébastien, SELOSSE Sandrine and MAÏZI Nadia (2016), TIMES-AlyC: A model for long-term energy prospective in South America, Applied Energy

#### **Interventions dans des conférences internationales**

POSTIC Sébastien, MAÏZI Nadia, SELOSSE Sandrine and ASSOUMOU Edi (2013), Energy trends in Latin America: a regional disaggregation meeting the requirements of the TIMES prospective approach, 4<sup>th</sup> ELAEE, Montevideo, Uruguay, April 8-9, 2013

POSTIC Sébastien, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2014), Combating Climate Change in Latin America: the energy prospect, UN Climate Change Conference 2014, COP20/CMP10, 1-12 December, Lima, Pérou; UNFCCC pavilion, December 3th.

SELOSSE Sandrine, POSTIC Sébastien, MAÏZI Nadia (2014), TIMES-America Latina y el Caribe: a TIMES model dedicated to South America and the Caribbean, 66th Semi-annual IEA-ETSAP workshop, UN City, 17-19 November, Copenhagen, Denmark.

POSTIC Sébastien, (2015), Energy sector contribution to climate action. The case of Latin America, ETSAP Workshop, 22-23 October, Sophia Antipolis, France.

POSTIC Sébastien, (2016), TIMES – America Latina y el Caribe. Hydropower and uncertainty, 14 March, International Energy Agency, Paris.

#### **Interventions dans des conférences nationales**

POSTIC Sébastien, (2015), Considérations énergétiques régionales pour l'Amérique Latine : Ressources et engagements climatiques, Journée de la Chaire Modélisation prospective : Prospective pour les enjeux Energie-Climat, « COP 21 et les négociations Climat au prisme des modèles de prospective », 2 mars 2015, MINES ParisTech, Paris.

#### **Working Paper**

POSTIC Sébastien, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2015), Energy sector contribution to regional climate action: The case of Latin America, Working Paper, Les Cahiers de la Chaire, N°2015-02-20

POSTIC Sébastien, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2015), TIMES Prospective Modeling for South America, and applications, Working Paper, Les Cahiers de la Chaire, N°2015-01-15

## **2. Modélisation prospective des bioénergies dans TIAM**

La seconde thèse que je supervise est en cours de réalisation. Elle a débuté en octobre 2014 et est menée par Seungwoo Kang. Elle porte les bioénergies avec l'implémentation dans TIAM-FR de leurs

échanges et des tensions sur l'eau induit par leur développement. A ce jour, ce travail a fait l'objet de plusieurs interventions lors de conférences internationales, de la publication d'un working paper dans Les Cahiers de la Chaire, de la publication d'un article dans une revue internationale et de la rédaction de deux articles soumis à des revues internationales. Seungwoo a également animé la session « The contribution of bioenergy of the future low carbon system: opportunities and challenges » lors de la conférence internationale EURO (European Conference on Operational Research), à Glasgow, Scotland, du 12 au 15 juillet 2015.

En outre, dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons mis en place une collaboration avec des chercheurs de l'équipe du World Energy Outlook (WEO) de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE). Ainsi, en 2015, Seungwoo a réalisé une étude sur les potentiels de développement de la bioénergie en Inde. Il a également passé une semaine dans les bureaux de l'AIE au cours du dernier trimestre 2015 afin de poursuivre un travail méthodologique de calcul des potentiels forestiers. En 2016, Seungwoo a de nouveau collaboré avec l'équipe du WEO afin d'analyser dans un premier temps l'évolution de la biomasse dans les pays développés et plus particulièrement en Europe. Il s'agissait d'étudier d'une part, les équipements finaux dans les ménages qui consomment de la bioénergie selon les types de foyer et d'autre part, les types de biomasse dans les ménages et ses évolutions au niveau de consommation selon les types de foyer. Dans un second temps, à l'aide de données fournies par l'AIE, Seungwoo a travaillé à la détermination de variables explicatives de l'évolution du choix énergétique dans les pays en voie de développement.

#### Description du sujet de thèse :

L'objectif général de cette thèse est d'opérer plusieurs extensions innovantes au modèle TIAM-FR en introduisant notamment les échanges internationaux de bioénergies et en développant le module eau en lien avec cette problématique. Face à la menace du changement climatique et des tensions sur les ressources (qu'elles soient énergétiques ou hydriques), l'usage croissant des bioénergies est considéré comme une piste possible. Disposer d'un outil capable d'évaluer de manière fiable et pertinente le rôle futur de ces ressources – et de ses technologies associées – s'avère ainsi nécessaire. Dans un premier temps, il conviendra d'évaluer les potentiels d'un marché de la biomasse. De récentes évaluations du potentiel de la ressource biomasse pour l'énergie mettent en avant le fait que cette ressource pourrait, de manière durable, contribuer de 160 à 270 EJ (exajoules) à l'approvisionnement en énergie primaire dans le monde en 2050 (Haberl et al. 2010). Pour autant, un certain nombre d'obstacles doivent être surmontés avant qu'un tel potentiel puisse être exploité, l'un des principaux résidant dans le fait que les plus importantes ressources en biomasse ne sont généralement pas situées à proximité des zones urbaines et industrielles. En outre, les pays qui pourraient devenir d'importants producteurs de biomasse ne sont pas systématiquement les mêmes que ceux qui pourraient en devenir d'importants utilisateurs. Alors que les marchés internationaux des bioénergies n'en sont encore qu'à leurs balbutiements, le commerce international des biocarburants, granulés de bois, éthanol et huile de palme est en pleine expansion. De plus, l'évolution des technologies de pré-traitement thermique, telles que la torréfaction, la gazéification et la pyrolyse, stimulent la production de produits bioénergie, ces derniers pouvant être transportés sur de longues distances (car très homogènes, ayant une haute densité énergétique et n'étant pas sensibles à la biodégradation). Le développement des centrales de co-combustion charbon/gaz et biomasse accroît la gamme des applications d'usage final de la biomasse, comme le développement potentiel de la BECSC. Pour autant, l'impact mondial que pourraient avoir

des échanges accrus de ces ressources sur le développement des bioénergies et des systèmes énergétiques n'est pas encore très clair. Les modèles intégrés utilisés pour estimer le développement du système énergétique mondial ne disposent généralement pas de déclinaisons et de données suffisantes concernant la croissance future de l'offre de biomasse et des technologies de pré-traitement thermique par exemple. Ils ne sont d'ailleurs généralement pas pris en compte, comme pour le moment dans TIAM-FR qui considère que la biomasse n'est pas échangée entre les régions. L'évaluation du potentiel que constitue la ressource biomasse et l'implémentation des échanges internationaux de biomasse et des technologies de pré-traitement dans le modèle constituent ainsi des éléments clés du programme de thèse.

Dans un second temps, il serait intéressant de compléter ces développements par la problématique des besoins en eau des bioénergies et des éventuelles tensions hydriques sous-jacentes. En effet, l'eau et l'énergie sont fortement interconnectées : l'énergie est nécessaire pour maintenir l'approvisionnement en eau alors que l'eau est essentielle pour produire de l'énergie. L'approche environnementale actuelle des questions liées à l'énergie ne se concentre le plus souvent que sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre, se traduisant alors par l'utilisation accrue de technologies qui fournissent une solution encore partielle à la pollution de l'air mais peuvent aggraver le stress hydrique car nécessitant de grandes quantités d'eau. De la même manière, l'utilisation accrue de certaines ressources, comme la biomasse, peut engendrer des tensions sur l'eau. Afin d'examiner conjointement les usages de l'eau et de l'énergie, un module sur l'eau a été développé et intégré à TIAM-FR. L'eau est ainsi déjà liée à l'extraction de l'énergie primaire, la transformation, et certaines centrales dans le secteur de l'électricité. Mais des développements sont encore à implémenter dans le modèle comme d'autres usages de l'eau, dans les transports et le secteur industriel. Il sera nécessaire de calibrer les besoins en eau pour de nouvelles utilisations de la biomasse, comme la culture des micro-algues à des fins de biocarburants qu'il serait intéressant d'implémenter.

#### **Articles publiés dans des revues internationales**

KANG Seungwoo, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2015), Strategy of bioenergy development in the largest energy consumers of Asia (China, India, Japan and South Korea), *Energy Strategy Reviews*, 8, pp.56-65; doi:10.1016/j.esr.2015.09.003

KANG Seungwoo, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2016), Is GHG mitigation policy enough to develop bioenergy in Asia: a long-term analysis with TIAM-FR, *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology (IJOGCT)*, Accepté

#### **Articles soumis à des revues internationales**

KANG Seungwoo, SELOSSE Sandrine and MAÏZI Nadia (2016), Contribution of global GHG reduction pledges to bioenergy expansion, *Journal of Biomass & Bioenergy*, Manuscript number: JBB-D-16-01094, En révision

#### **Interventions dans des conférences internationales**

KANG Seungwoo, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2016), Contribution of global CO<sub>2</sub> emissions pledges to bioenergy market expansion: A long-term analysis of bioenergy trade using TIAM-FR model, 24<sup>th</sup> EUBCE – European Biomass Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 6-9 June (poster)

KANG Seungwoo, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2015), India's long-term pathways for bioenergy: scenario analysis using TIAM-FR model, EURO XXVII, European Conference on Operational Research, Glasgow, Scotland, July 12-15

KANG Seungwoo, SELOSSE Sandrine, MAÏZI Nadia (2015), What Development for Bioenergy in Asia: A Long-term Analysis of the Effects of Policy Instruments using TIAM-FR model, IBSCE 2015, Oct 2015, Shanghai, China. ETA-Florence Renewable Energies, Proceedings of the International Bioenergy (Shanghai) and Asian Bioenergy Conference, pp.149-153 - ISBN 978-88-89407-13-4

SELOSSE Sandrine, KANG Seungwoo, MAÏZI Nadia (2016), On the way to a decarbonized world: an analysis of the Paris Climate Agreement with TIAM-FR, The 35th Edition of the International Energy Workshop (IEW), June 1-3, 2016, University College of Cork, Cork, Ireland

### **Interventions dans des conférences nationales**

KANG Seungwoo, (2016), Du global au local : comment la gouvernance climatique interfère sur les enjeux locaux : les INDCs et leurs implications pour les choix énergétiques (le secteur de la biomasse chez les grands émergents), Journée de la Chaire – GRTgaz : « Anticiper le rôle de l'énergie dans le développement humain. Les apports d'une démarche prospective. Les apports d'outils de prospective. », 14 décembre 2016, MINES ParisTech, Paris.

### **Working Paper**

KANG Seungwoo, SELOSSE Sandrine and MAÏZI Nadia, Methodological long-term analysis of global bioenergy potential, Working Paper, Les Cahiers de la Chaire, N°2016-03-21

### **Séminaire interne**

Seungwoo Kang, (2015), Evolution de la bioénergie en Asie, Séminaire interne du CMA, 18 mai 2015

## **B. SUPERVISION DE POST-DOCTORANTS**

J'ai également participé à l'embauche de deux post-doctorantes que j'ai « supervisées » durant l'année qu'elles ont passé au Centre de Mathématiques Appliquées. Mon rôle a plus précisément été de rédiger la fiche de poste incluant la détermination du périmètre de la recherche attendue, puis le suivi et l'orientation des activités de recherche et enfin la mise en place d'un travail collaboratif.

### **1. Capture et stockage géologique du carbone à partir de la biomasse**

Chercheur : Olivia Ricci, docteur en économie de l'Université d'Orléans (LEO)

Période : Septembre 2012 à septembre 2013

Sujet de recherche : Capture et stockage géologique du carbone à partir de la biomasse

Activités de recherche :

- Etude des implications économiques du développement de la BCSC dans les systèmes électriques
- Dépôt d'un projet de recherche : Global Climate and Energy Project (GCEP), Stanford University : Net Negative Carbon Emissions in Energy Supply, Evaluation of Bioenergies with Carbon Capture and Storage (BECCS) potential using the integrated energy and economic model TIAM-FR

- Soumission de trois articles co-écrits qui ont été publiés dans des revues internationales

## **2. Consommation et maîtrise de l'énergie ; Gestion des déchets**

Chercheur : Ankinée Kirakozian, docteur en économie de l'Université de Nice Sophia Antipolis (GREDEG)

Période : Septembre 2016 à septembre 2017

Sujet de recherche : ♦ Consommation et maîtrise de l'énergie : modes de consommation, comportements et critères de choix des consommateurs, déterminants des décisions de consommation et de maîtrise de l'énergie

- ♦ Analyse des filières de gestion et valorisation des déchets

Activités de recherche :

- Mettre en place une étude de la consommation énergétique suivant une approche d'économie comportementale
- Etudier la représentation des filières de gestion et valorisation des déchets dans les modèles de prospective long terme : étude exploratoire et réflexion d'une implémentation dans les modèles de la famille TIMES
- Mise en place d'une enquête dans le cadre des négociations climatiques internationales, traitement et analyse des résultats
- Dépôt d'un projet de recherche : Financement de l'IDEX UCA<sup>jedi</sup>, Académie 5
  - Projet MUFFINS : Measuring nudges' efficacy on energy consumption, sous la direction de Christophe Charlier, UCA/CNRS/GREDEG.
- Objectif de production scientifique : Soumission d'articles co-écrits pour publication dans des revues internationales, participation à des conférences et organisation d'un colloque

## **C. ENCADREMENT D'ELEVES DU MASTERE SPECIALISE OPTIMISATION DES SYSTEMES ENERGETIQUES (OSE)**

Depuis mon arrivée au CMA, je suis impliquée dans le programme du Mastère Spécialisé<sup>61</sup> Optimisation des Systèmes Energétiques (MS OSE) que ce soit dans des activités d'enseignement ou de supervision de stages ou plus généralement dans la participation au déroulement du MS OSE (avec par exemple une participation aux diverses soutenances et présentations des élèves, une relecture des publications, etc.). S'agissant de l'encadrement, il se situe à deux niveaux :

- Tutorat pédagogique et académique des élèves dans leur mission industrielle ou institutionnelle.

---

<sup>61</sup> Le Mastère Spécialisé® (MS) est un diplôme labellisé délivré par un établissement membre de la Conférence des grandes écoles dans le cadre d'une formation accréditée. Le label Mastère Spécialisé® est une marque collective (déposée) propriété de la Conférence des grandes écoles, créé en 1983 pour répondre à une demande des entreprises françaises qui souhaitent recruter des diplômés possédant des compétences dans des spécialisations très pointues et pour des fonctions dans des secteurs très précis. Il garantit la vocation professionnelle affirmée, la rigueur et la technicité des enseignements dispensés. Il permet aux étudiants de développer leurs meilleurs atouts : en cela, il constitue un tremplin pour leur carrière professionnelle. Il s'agit d'un diplôme validant un niveau Bac+6. Plus d'informations sur : <http://www.cge.asso.fr/nos-labels/ms>

- Encadrement des stagiaires dans leur mission académique au CMA.

## 1. Tutorat académique

Les missions industrielles ou institutionnelles des élèves se déroulent en deux temps, un premier temps de veille technologique et un second temps de mission, en tant que telle, de 6 mois au sein du partenaire industriel ou institutionnel. Le travail de veille technologique est défini en accord avec ce dernier et vise à la préparation du stage de fin d'études. Cette première phase représente un volume d'environ 100 heures qui sont réalisées au CMA ou, suivant les cas, au sein de l'entreprise accueillante. Cette période de veille permet à l'élève de se familiariser avec les techniques de veille technologique, d'étudier le sujet du stage plus en détail, de réaliser une étude bibliographique approfondie et d'être opérationnel dès son arrivée en situation industrielle. A l'issue de cette première phase, un rapport de veille technologique est rendu et présenté en soutenance. Le stage quant à lui s'effectue pendant 6 mois en milieu industriel et est sanctionné par la rédaction et la soutenance d'une thèse professionnelle. Ces périodes de veille et de stage sont encadrées conjointement par un responsable industriel et un tuteur pédagogique<sup>62</sup>. De 2009 à 2016, j'ai été la tutrice dans leur mission industrielle de 15 élèves du MS OSE :

2008-2009 : Anne-Laure Dubilly, EDF R&D : Prospective de la demande en énergie à 2050 : construction d'un modèle.

2009-2010 : Diane Julien de Zelicourt, Saint-Gobain : Energie & environnement dans la construction : analyser un matériau, une opportunité de marché et une solution industrielle.

2010-2011 : Marion Labatut, EDF R&D, Une méthodologie de calcul d'empreinte énergétique pour différentes catégories de ménages en France.

2011-2012 : Karim Amzal, Roquette Frères, Energy portfolio Analyst : les marchés du gaz naturel

2012-2013 : Simona De Lauretis, EDF R&D, Prospective énergétique territoriale. Impact de la forme urbaine et de l'offre de transports collectifs sur le report modal.

2012-2013 : Guillaume Jannin, EDF DMCTS – Projet Ville durable, Elaboration de la stratégie énergétique d'une collectivité

2012-2013 : Reda Bouij, EDF DMCTS – Projet Ville durable, Elaboration de la stratégie énergétique d'une collectivité

2013-2014 : Henry-Pierre Demay, EDF R&D, Evaluation économique des systèmes d'information des infrastructures Smart Grids

2014-2015 : Alice Didelot, Schneider Electric, Impacts of fossil fuels extraction costs and carbon pricing on energy efficiency policies.<sup>63</sup>

---

<sup>62</sup> <http://ose.cma.mines-paristech.fr/>

<sup>63</sup> Un article a été publié suite à ce travail : DIDELOT Alice, MAÏZI Nadia, MAZAUURIC Vincent, ASSOUMOU Edi and SELOSSE Sandrine (2016), Balancing Energy Efficiency and Fossil Fuel: The role of carbon pricing, Energy Procedia,

2014-2015 : Laura Barbier, EDF R&D, L'emprise énergétique du système productif

2015-2016 : Abdelmoghith El Belhadji, EDF R&D, Economie des systèmes énergétiques locaux multi-énergie.

2015-2016 : Camille Freycenon, Sanofi, Management de la performance énergétique des sites industriels de Sanofi.

2016-2017 : Sami Guardaddou, EDF R&D, Analyse de l'intégration du PV et Stockage dans des Sites Tertiaires

2016-2017 : Thibaud Roy, EDF SEI, Appui à la mise en place d'une politique Open Data et réalisation de proof of concept pour la valorisation des données de comptage numérique au service de clients et de la performance opérationnelle de l'entreprise

## **2. Encadrement de stagiaires OSE**

Plusieurs élèves du Mastère Spécialisé OSE ont également réalisé leur stage au sein du CMA dans le cadre d'une mission académique spécifique dont nous sommes les destinataires et bénéficiaires des résultats. J'en ai encadré ou co-supervisé sept depuis mon arrivée à MINES ParisTech sur différents sujets. Ces stages sont menés sur une période de six mois, d'avril à fin septembre, faisant suite à la période de veille technologique comme décrite dans la section précédente.

### **a. Modélisation TIAM/Monde**

Ce sujet de stage a été traité en 2008-2009 par Benoît Lentz, dans le cadre de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable. Il s'agissait dans un premier temps de proposer une note de fonctionnement du modèle TIAM en insistant sur ses caractéristiques propres par rapport aux autres modèles de la famille TIMES. Ensuite, ce travail a été complété par une analyse des études menées à l'aide du modèle TIAM en mettant en exergue les applications et les propriétés associées. Enfin, Benoît a proposé une étude sur la situation énergétique mondiale et les conséquences de la mise en place de réglementations des émissions de CO<sub>2</sub> pour plusieurs régions du monde. Il a réalisé une comparaison des prix des énergies primaires supposés dans divers modèles et études. Son étude des marchés gaziers et pétroliers a permis notamment la mise à jour de certaines données du modèle, comme les coûts des énergies.

Rapport : Benoît LENTZ, Modélisation TIAM/Monde, septembre 2009, 68p.

### **b. Implémentation des usages de l'eau dans le modèle énergétique TIAM-FR**

Ce sujet a été traité en 2009-2010 par Stéphanie Bouckaert lors d'une mission co-encadrée avec Nadia Maïzi et réalisée dans le cadre de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable. L'objectif de ce stage était d'implémenter l'utilisation de l'eau (consommation et prélèvement) dans les procédés énergétiques de TIAM. Ainsi différents usages qui sont faits de l'eau tout au long de la chaîne énergétique ont été considérés, tout comme le type d'eau utilisée : eau douce, eau saumâtre, eau des réseaux municipaux, eau souterraine, eau saline (les quatre derniers types d'eau ayant été uniquement utilisés pour les systèmes de refroidissement ouverts). Ce travail a permis de disposer d'un des premiers modèles énergétiques prenant en compte l'impact des contraintes énergétiques sur la

ressource eau et sur l'évolution de ses usages. Il a notamment permis de considérer plus finement les régions en situation de stress hydrique.

Ce travail a fait l'objet d'une présentation pendant le stage lors de la 11<sup>ème</sup> Conférence européenne de l'International Association of Energy Economics, à Vilnius (Lithuanie), du 25 au 28 août 2010.

Rapport : Stéphanie Bouckaert, Implémentation des usages de l'eau dans le modèle énergétique TIAM-FR, septembre 2010, 100p.

### **c. Critical analysis of ECF's ROADMAP 2050**

Ce sujet a été traité en 2010-2011 par Adrien Atayi lors d'un stage co-encadré avec Nadia Maïzi et réalisé dans le cadre d'un projet financé par le CNRS, en partenariat avec l'IER de l'Université de Stuttgart (centre de recherche représentant l'Allemagne dans le consortium ETSAP). Ce projet, « Roadmap to 2050 : the French and German analysis », visait à développer une analyse critique du rapport, Roadmap 2050, publié à l'initiative de la Fondation européenne pour le climat (ECF) et développé par un consortium d'experts financés par l'ECF<sup>64</sup>. Ces derniers proposaient une analyse technique et économique de la faisabilité de réduire les émissions de GES en Europe de 80 % en 2050 par rapport au niveau de 1990 en conservant le même niveau de fiabilité de la fourniture d'électricité qu'aujourd'hui (99.97 %). Pour se faire, trois scénarios d'évolution du mix électrique étaient décrits. Dans ce contexte, l'objectif de la mission d'Adrien était de fournir une analyse critique de cette roadmap et d'en déterminer l'impact régional. Grâce à TIAM-FR, Adrien a sélectionné le scénario le plus plausible puis il a évalué l'impact de ce scénario sur les différents secteurs d'activités à l'échelle européenne et sur le mix électrique de chaque pays. Les principaux résultats de l'analyse menée lors de ce stage sont qu'un certain nombre d'hypothèses du rapport sont insuffisamment justifiées voire contradictoires, comme par exemple l'objectif de 95 % de réduction de GES pour le secteur électrique, même si ce secteur est en effet central pour atteindre l'objectif de réduction de 80 % des émissions de GES. D'autre part le scénario le plus proche d'une solution « optimale » est celui comprenant 40 % d'énergies renouvelables. Enfin, l'impact régional de ce scénario est particulièrement sensible au développement des capacités d'interconnexions.

En plus des rapports et des présentations de restitution dans le cadre du projet, ce travail a également fait l'objet pendant le stage d'une présentation lors de la Conférence CaReTech 2011, the International Conference on Carbon Reduction Technologies, au Polish Jurassic Highland, en Pologne, du 19 au 22 septembre 2011.

Rapport : Adrien Atayi, Critical analysis of ECF's ROADMAP 2050, septembre 2011, 56p.

### **d. Prospective carbone et efficacité énergétique**

Ce sujet a été traité en 2010-2011 par Matthieu Thiboust lors d'un stage co-encadré avec Nadia Maïzi et réalisé dans le cadre de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable en partenariat avec Schneider Electric. L'objectif de cette mission était d'étudier et de quantifier

---

<sup>64</sup> Le projet Roadmap 2050 de l'ECF était de proposer des trajectoires pour parvenir à une économie sobre en carbone en Europe, tenant compte des questions de sécurité énergétique, d'environnement et des objectifs économiques de l'Union européenne. Le rapport « *Roadmap 2050: a Practical Guide to a Prosperous, Low-Carbon Europe* » est publié sur le site [www.roadmap2050.eu](http://www.roadmap2050.eu).

l'influence des différentes contraintes carbone sur le business des entreprises réalisant de la gestion de l'énergie, soit Schneider Electric dans ce cas plus précisément. A l'aide du modèle TIAM-FR, sur un horizon à 2050, l'étude s'est appuyée sur l'approche prospective pour « Quantifier les impacts d'un durcissement des engagements climatiques d'une région donnée sur les investissements en solutions d'efficacité énergétique, de manière à identifier les opportunités de business pour Schneider Electric ». Pour se faire, Matthieu a implémenté dans le modèle d'optimisation des technologies d'efficacité énergétique et les a confrontées aux différentes solutions permettant d'éviter d'émettre du CO<sub>2</sub> (énergies renouvelables, CSC, nucléaire, etc.) afin de quantifier la sensibilité du business de l'efficacité énergétique en fonction du niveau de la contrainte carbone. L'horizon temporel était 2020 et un focus régional a été réalisé sur l'Europe, les Etats-Unis et la Chine. A noter que dans le cadre de ce stage, Matthieu a poursuivi sa mission pendant deux mois à Pékin afin d'appliquer le modèle à la stratégie carbone de Schneider Electric et d'approfondir son travail exploratoire sur la Chine. Ce séjour lui a entre autres permis de suivre diverses discussions spécifiques au 12<sup>ème</sup> plan quinquennal chinois couvrant la période allant de 2011 à 2015. A noter que l'une des discussions particulièrement marquantes était l'impossibilité du gouvernement chinois à estimer le nombre de centrales à charbon en fonctionnement sur son sol, conduisant à une importante sous-évaluation de sa consommation en charbon et donc de ses émissions de CO<sub>2</sub>, tel qu'officiellement révélé plus tard en 2015 : « Je connaissais ces chiffres, qui proviennent d'une enquête au niveau national mais qui n'ont été rendus publics par le bureau des statistiques que plus récemment, précise Lin Boqiang, professeur à l'université de Xiamen (dans le sud-est du pays) et directeur du Centre de l'économie de l'énergie. De nombreuses personnes sont au courant. »<sup>65</sup> (Le Monde, 4 novembre 2015, « Pollution : La Chine a largement sous-évalué sa consommation de charbon »).

Ce travail a également fait l'objet pendant le stage d'une présentation Poster lors de la Conférence CaReTech 2011, the International Conference on Carbon Reduction Technologies, au Polish Jurassic Highland, en Pologne, du 19 au 22 septembre 2011.

Rapport : Matthieu Thiboust, Prospective carbone & efficacité énergétique, septembre 2011, 51p.

### **e. Energy efficiency solutions for residential and commercial applications in Europe. A prospective study to 2035**

Ce sujet a été traité en 2011-2012 par Sébastien Postic lors d'un stage co-encadré avec Nadia Maïzi et Edi Assoumou et réalisé dans le cadre de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable en partenariat avec Schneider Electric. Cette mission portait sur une évaluation des perspectives de développement d'équipements de contrôle actif, sur la période 2012-2035. Pour se faire, des solutions de contrôle actif et d'isolation ont donc été implémentées dans le modèle énergétique paneuropéen TIMES puis leur déploiement a été analysé suivant diverses hypothèses économiques ou de politiques. Plus précisément, le modèle paneuropéen TIMES-PET décrit l'Europe avec un niveau de détail fin pour chacune des 30 régions représentées (27 pays de l'Union européenne, Norvège, Suisse et Islande). Le modèle se focalise sur le secteur électrique et les secteurs résidentiel-tertiaire. Ainsi, ont été confrontées deux orientations visant une économie d'énergie, le contrôle actif dans un premier temps, partant du principe que la manière la plus simple d'économiser l'énergie est de

---

<sup>65</sup> [http://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2015/11/04/la-chine-pollue-beaucoup-plus-que-ce-qu-elle-pensait-ce-que-ca-represente-vraiment\\_4803076\\_4355770.html](http://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2015/11/04/la-chine-pollue-beaucoup-plus-que-ce-qu-elle-pensait-ce-que-ca-represente-vraiment_4803076_4355770.html)

ne pas la consommer et, dans un second temps, les solutions d'efficacité énergétique dite passive, incluant l'isolation et la remise à neuf.

Rapport: Sébastien Postic, Energy efficiency solutions for residential and commercial applications in Europe. A perspective study to 2035, Septembre 2012, 75p.

#### **f. Prospective, aménagement du territoire, développement durable et vision artistique**

Ce sujet a été traité en 2011-2012 par Stève Lechevalier lors d'un stage s'inscrivant dans le cadre du projet ECOTYPE que j'ai coordonné pour la partie réalisée au CMA, soit plus précisément dans le cadre du projet de création d'un jeu-outil de sensibilisation des habitants d'une commune et des collectivités locales à la question de l'aménagement de leur territoire dans un contexte de développement durable, d'empreinte énergétique et écologique (ce projet est décrit plus en détail dans la section II.2.B.1.3.) . Stève a ainsi eu en charge le développement du modèle prospectif simplifié appliqué au territoire valbonnais. Il a ainsi tout d'abord conçu le système d'interactions au sein de cette commune (dans un souci de réplcation possible future à toute autre territoire) exprimant notamment la consommation et la production d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre, la population et l'occupation des sols, les transports, l'agriculture, la consommation d'eau, la production de déchets, la préservation de la biodiversité, l'économie, l'habitat ou bien encore les politiques sociales et environnementales. Il a ainsi déterminé les interactions pouvant exister entre ces différentes variables qui interagissent les unes avec les autres ainsi que leurs trajectoires possibles d'évolution en 2020 et 2050. Différents scénarios ont été développés pour exprimer des choix différents d'aménagement du territoire, choix qui ont été proposés au joueur pour qu'il puisse décider de l'avenir de son territoire dans un souci d'enjeu collectif. Le modèle local, avec toutes les interdépendances qui le caractérise, a ensuite été extrapolé à l'échelle nationale. Des premiers éléments ont été intégrés pour l'extrapolation mondiale.

Ce travail a également fait l'objet d'une présentation lors de la 25<sup>ème</sup> European Conference on Operational Research, à Vilnius (Lithuanie), du 8 au 11 juillet 2012.

Rapport: Stève Lechevalier, Projet ECOTYPE : Prospective, aménagement du territoire, développement durable et vision artistique, Septembre 2012, 60p.

#### **g. Recalibrage du modèle TIAM-FR**

Ce sujet a été traité en 2013-2014 par Nicolas Garcia, lors d'un stage réalisé dans le cadre de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable. L'objectif du stage était de travailler au recalibrage du modèle TIAM-FR afin de paramétrer 2010 comme année de référence. En effet, la pérennité d'un tel modèle repose en partie sur la pertinence et la qualité des données qui le constituent. Une mise à jour régulière de ses données s'avère ainsi nécessaire. La « totalité » des données statistiques énergétiques de l'AIE étant disponibles pour l'année 2010, il était intéressant de faire évoluer le modèle et de paramétrer 2010 comme année de référence. La mission de Nicolas s'insérait donc dans cet objectif. Il s'agissait plus précisément de travailler sur les bilans énergétiques de chacune des régions du modèle, sans oublier les focus sur les coûts et potentiels d'extraction, les coûts d'échange, etc. Un travail sur les scénarios d'évolution des énergies et sur les contraintes de déploiement des technologies au cours de tout l'horizon temporel fut également nécessaire. Même si le cœur du travail concernait la période initiale du modèle, des ajustements sur toute la période ont dû

être pensés et opérés. Au cours de son stage, Nicolas a également travaillé sur une étude des trajectoires technologiques permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de conduire à un futur décarboné. Il a particulièrement analysé le rôle des technologies de capture et de séquestration du carbone suivant différentes ressources et différentes régions du monde.

Ce travail a été présenté lors du Second International Symposium on Energy Challenges & Mechanics, à Aberdeen (Scotland), du 19 au 21 août 2014.

Rapport : Nicolas Garcia, Recalibrage du modèle TIAM-FR, Septembre 2014, 93p.

## **D. ENCADREMENT D'ETUDIANTS**

### **1. Capture et Séquestration du Carbone**

Du 3 juillet 2013 au 14 août 2013, j'ai supervisé le stage de 3<sup>ème</sup> année de Govind Malhotra dans le cadre de son cursus en Mining Engineering à l'Indian Institute of Technology – Banaras Hindu University, Varanasi, India. L'objectif de ce stage était de soutenir les travaux de recherche réalisés sur l'évolution des systèmes énergétiques mondiaux dans un contexte de contraintes de décarbonisation et plus précisément les travaux sur la capture et la séquestration du carbone (CSC). Govind s'est concentré sur la question du potentiel de séquestration du carbone. Son travail a consisté en deux parties. Dans un premier temps, il a conduit une revue de littérature des potentiels de séquestration du carbone, par région et par type de site. Il a également réalisé une classification onshore/offshore des potentiels provenant des aquifères salins profonds. A l'issue de ce travail exploratoire, Govind a constitué une base de données de ces différents potentiels. Dans un second temps, Govind s'est penché sur la question des coûts de stockage et de transport du carbone et a réalisé une analyse comparative qui a permis d'implémenter des scénarios différenciés de coûts suivant la localisation des sites.

Rapport : Carbon capture and sequestration: Potential of storage and Costs analysis, Août 2013

Ce travail a permis la réalisation d'une étude de sensibilité touchant à l'importance des potentiels de stockage du carbone qui a notamment été publié dans la revue Applied Energy.

## BIBLIOGRAPHIE

- Ahuja D. and Tatsutani M. (2009). Sustainable energy for developing countries. S.A.P.I.E.N.S., 2.1, Online: <https://sapiens.revues.org/823#article-823>
- Ali Benali A. (2003), « Le développement de l'enseignement supérieur du pétrole (1919-1939) », AISLF, Journées GT6 « Science, innovation, technologie et société », Dijon, 29-31 janvier
- Arrow K. J. (1962), « Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention », in R. R. Nelson éd., *The rate and direction of invention activity: economic and social factors*, Princeton University Press, pp. 609-627
- Aszodi A. (2007), « The perils of industrialization. How the industrialization of academic science has ruined research, and what we can do about it », *The Scientist*, Vol. 21, Issue 8
- Auger J.-F. (2003), *Le mouvement de recherche industrielle dans la vallée du Rhin à l'époque de Guillaume II*, AISLF, Journées GT6 « Science, innovation, technologie et société », Dijon, 29-31 janvier
- Azar, C., Lindgren, K., Larson, E., Möllersten, K., 2006. Carbon capture and storage from fossil fuels and biomass costs and potential role in stabilizing the atmosphere. *Climatic Change* 74, 47-49.
- Azar, C., Lindgren, K., Obersteiner, M., Riahi, K., Van Vuuren, D., Michel, K., 2010. The feasibility of low CO<sub>2</sub> concentration targets and the role of bio-energy with carbon capture and storage (BECCS). *Climatic Change* 100, 195-202.
- Bachu S., "Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media in response to climate change", *Environmental Geology*, 2003, 44: 277-289
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N-P. & Mathiassen, O-M. (2007). CO<sub>2</sub> storage capacity estimation: Methodology and gaps. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1, 430-443.
- Bayh B. (2004), [en ligne], Statement to the National Institute of Health, May 25, 8p., <http://ott.od.nih.gov/policy/meeting/Senator-Birch-Bayh.pdf>, (page dernièrement consultée en octobre 2007 mais plus disponible depuis)
- Bertha S. L. (1996), « Academic research : policies and practice », *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 51, n° 1-3, pp. 59-73
- Blohm-Hieber Ute, 2012. Energy Policy Framework, Roadmap 2050, ESNII Conference, Brussels, 25 June.
- Bock B., Rhudy R., Herzog H., Klett M., Davison J., De la Torre Ugarte D. G., Simbeck D., Economic evaluation of CO<sub>2</sub> storage and sink enhancement option", Final Technical Report, DE-FC26-00NT40937, 2003, February, 479p.
- Bodansky D. (2016), *The Paris Climate Change Agreement: a new hope?*, forthcoming in *American Journal of International Law*.
- Bouckaert S., (2013). Contribution des Smart Grids à la transition énergétique : évaluation dans des scénarios long terme, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011, Français. <NNT : 2013ENMP0056>. <pastel-00959266>.

- Bradshaw, J., Bachu, S., Bonijoly, D., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N-P. & Mathiassen, O-M. (2007). CO<sub>2</sub> storage capacity estimation: Issues and developments of standards, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1, 62-68.
- Brew-Hammond A., 2010, Energy access in Africa: Challenges ahead, *Energy Policy*, 38, 2291-2301
- Bush V. (1945), *Science, The Endless Frontier, Report of the President*, July, 24p
- Callon M. (1991a), « Réseaux technico-économiques et irréversibilités », in Boyer, Chavance & Godard, *Les figures de l'irréversibilité en économie*, EHESS, Paris, pp. 195-230
- Callon M. (1991b), « La dynamique des Réseaux technico-économiques : essai d'intégration des apports récents de la sociologie des sciences et de l'économie du changement technique », in Boyer, Chavance & Godard, *Les figures de l'irréversibilité en économie*, EHESS, Paris
- Casella, H., Delbosq, A., de Perthuis, C. (2010) —Cancun: Year One of the Post-Copenhagen Era” Climate Report n°24, CDC Climat Research
- Criqui, P., Ilasca, C. (2010) —Les engagement pris à Copenhague et la question de la comparabilité des efforts| Note de travail n°6/2010 LEPII.
- Dahowski RT, Davidson CL, Dooley JJ, “Comparing large scale CCS deployment potential in the USA and China: a detailed analysis based on country-specific CO<sub>2</sub> transport & storage cost curves”, *Energy Procedia*, 2011, 4: 2732-2739
- Dellink, R., Briner G., Clapp,C. (2010) —Costs, Revenues, and Effectiveness of the Copenhagen Accord Emission Pledges for 2020| OECD Environment Working Papers, No.22, OECD Publishing.doi:10.1787/5km975plmzg6-en.
- den Elzen, M.G.J., et al. (2011b) —The Copenhagen Accord: abatement costs and carbon prices resulting from the submissions. *Environmental Science & Policy* 14, 28–39
- den Elzen, M.G.J., Hof, A.F., Roelfsema, M. (2011a) —The emissions gap between the Copenhagen pledges and the 2°C climate goal: Options for closing risks that could widen the gap”, *Global Environmental Change* 21, 733-743
- DOE/NETL, Carbon Utilization and Storage Atlas – Fourth Edition (Atlas IV), 2012, 130p. <http://www.netl.doe.gov/research/coal/carbon-storage/natcarb-atlas>
- Dooley James J. and Friedman S.J.. A Regionally disaggregated global accounting of CO<sub>2</sub> storage capacity: data and assumptions. Battelle Pacific Northwest Division, 2004, Technical Report Number PNWD-3431.
- Dooley JJ and Friedman S.J., A Global but Regionally Disaggregated Accounting of CO<sub>2</sub> Storage Capacity: Data and Assumptions for Compiling Regional CO<sub>2</sub> Storage Capacity Supply Curves for Incorporation within OBJECTS>MiniCAM., Lawrence Livermore National Laboratory. 2005, UCRL-SR-209663
- Dooley JJ, SH Kim, JA Edmonds, SJ Friedman, and MA Wise. A First Order Global Geologic CO<sub>2</sub> Storage Potential Supply Curve and its Application in a Global Integrated Assessment Model. Pages 573-581 in *Greenhouse Gas Control Technologies*, 2005, Volume I, eds ES Rubin, DW Keith, and CF Gilboy, Elsevier Science.

- Dornburg V, Faaij APC, Verweij PA, Langeveld H, van de Ven G, Wester F, et al., 2008. Biomass assessment: assessment of global biomass potentials and their links to food, water, biodiversity, energy demand and economy. Climate change scientific assessment and policy analysis (WAB) programme.
- Drouineau M., (2011). Modélisation prospective et analyse spatio-temporelle : intégration de la dynamique du réseau électrique, Energie électrique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011, Français. <NNT : 2011ENMP0104>. <pastel-00731894>.
- Edenhofer O., Knopf B., Barker T., Baumstark L., Bellevrat E., Chateau B., Criqui P., Isaac M., Kitous A., Kypreos S., Leimbach M., Lessmann K., Magne B., Scricciu B, Turton H., van Vuuren D. P. (2010). The Economics of Low Stabilization: Model Comparison of Mitigation Strategies and Costs, The Energy Journal, Volume 31, Special Issue.
- Emhjellen M. and Osmundsen P. (2013). CCS – Failing to pass decision gates, USAEE WP n°13-144, 11p.
- Etzkowitz H. and Leydesdorff L. (1997), « The dynamics of innovation: from national systems and "mode 2" to a triple helix of university-industry-government relations », <http://users.fmg.uva.nl/lleydesdorff/rp2000/>
- Etzkowitz H. et Leydesdorff L. (2000), « Le « Mode 2 » et la globalisation des systèmes d'innovation « nationaux ». Le modèle à Triple hélice des relations entre université, industrie et gouvernement », Sociologie et sociétés, vol. 32, n° 1, printemps, 21p.
- Europa (2002), [en ligne], « Le temps des chercheurs-entrepreneurs », Recherche européenne. L'info, <http://ec.europa.eu/research/news-centre/fr/pur/02-10-pur01c.html>, (page dernièrement consultée en octobre 2007 mais plus disponible depuis)
- Favennec Jean-Pierre (sous la direction de), 2009, L'Energie en Afrique à l'horizon 2050, Rapport de l'Agence Française de Développement et de la Banque Africaine de Développement, 84p.
- Fidge A., Espergren K., Wangen M., Seljom P., Ramirez A., Hoefnagels R., Wu Z., ven den Broek M., Strachan N., Blesl M., Kober T., Grohnheit P-E, Lüthje M., "Analysis of potentials and costs of CO<sub>2</sub> storage in the Utsira aquifer in the North Sea", Final Report for the FENCO ERA-NET project, 2010, May, 51p
- Forsell N. and Selosse S., 2012, Importance of bioenergy markets for the development of the global energy system, International Energy Workshop, Cape Town, South Africa, 19-22 June.
- Friedmann, S. J., Dooley, J. J., Held, H. and Edenhofer, O. (2006). The low cost of geological assessment for underground CO<sub>2</sub> storage: Policy and economic implications. Energy Conversion and Management, 47 (13-14), 1894-1901.
- Geuna A. and Nesta L. (2006), « University patenting and its effects on academic research: The emerging European evidence », Research Policy, n° 35, pp. 790-807
- Haberl H, Beringer T, Bhattacharya SC, Erb KH, Hoogwijk M., 2010. The global technical potential of bio-energy in 2050 considering sustainability constraints. Current Opinion in Environmental Sustainability 2(5-6), 394 – 403.

Henderson R. and COCKBURN I. (1996), « Scale, scope and spillovers: the determinants of research productivity in drug discovery », *RAND Journal of Economics*, The RAND Corporation, vol. 27, n° 1, spring, pp. 32-59

Hendriks, C., Graus, W., van Bergen, F., (2004). Global carbon dioxide storage potential and costs. Report by Ecofys in cooperation with TNO. EEP-02001 by order of the: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (Dutch National Institute for Public Health and the Environment).

Heurax Christine, 2010, *L'Electricité au cœur des défis africains. Manuel sur l'électrification en Afrique* », Karthala, 406p.

IEA (2016), *Energy Technology Perspectives*, OECD/IEA, 418p.

IEA GHG, “A regional assessment of the potential for CO<sub>2</sub> storage in the Indian Subcontinent”, Technical study, 2008, Report n° 2008/2, May, 214p.

IEA GHG, “Aquifer storage – Development issues”, Technical study, 2008, Report n° 2008/12, November, 203p.

IEA GHG, “Building the cost curves for CO<sub>2</sub> storage: European sector”, 2005, Report n° 2005/2, February, 170p.

IEA GHG, “CO<sub>2</sub> pipeline infrastructure: An analysis of global challenge and opportunities”, Final Report, 2010. Element Energy. IEA.

IEA GHG, “CO<sub>2</sub> storage in depleted gas fields”, Technical study, 2009a, Report n° 2009/1, June, 121p.

IEA GHG, “Development of storage coefficients for carbon dioxide storage in deep saline formations”, Technical study, 2009b, Report n° 2009/13, November, 118p.

IEA Statistics, 2011 Edition, *Energy statistics of non-OECD countries*

IEA, “CO<sub>2</sub> capture and storage : A key carbon abatement option”, Paris: International Energy Agency, 2008, ISBN 978-92-64-04140-0, 266 pages

IEA, 2016, *Key world energy statistics*, OECD/IEA.

IFDD (2016), *De Paris à Marrakech ou le défi de la mise en œuvre. Guide des négociations. Vingt-deuxième Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CdP22, CRP12, CRA1)*, Institut de la Francophonie pour le développement durable, 250p.

IPCC, 2014. *Climate Change. 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, et L.L.White(dir.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis d'Amérique, 1132 pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2011. *Renewables Energy Sources and Climate Change Mitigation, Special Report, Chapter 2*. Cambridge University Press, Cambridge.

- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Glossary, Japan. [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf\\_files/Glossary\\_Acronyms\\_BasicInfo/Glossary.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/Glossary_Acronyms_BasicInfo/Glossary.pdf)
- Joly P.-B. et Mangematin V. (1996), « Profile of public laboratories, industrial partnerships and organisation of R&D: the dynamics of industrial relationships in a large research organisation », *Research policy*, n° 25, pp. 901-922
- Jung J.-Y., Huh C., Kang S.-G., Seo Y., Chang D., “CO2 transport strategy and its cost estimation for the offshore CCS in Korea”, *Applied Energy*, 2013, 111: 1054-1060.
- Katofsky, R., Stanberry, M., Frantzis, L., 2010. Achieving climate stabilization in an insecure world: does renewable energy hold the key? Report International Energy Agency - Renewable Energy Technology Development.
- Knoope M.M.J., Ramirez A. and Faaij A.P.C., A state-of-the-art review of technico-economic models predicting the costs of CO<sub>2</sub> pipeline transport, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 16: 241-270
- Kolenkovic I., Saftic B. and Peresin D., “Regional capacity estimates for CO<sub>2</sub> geological storage in deep saline aquifers – Upper Miocene sandstones in the SW part of the Pannonian basin”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 16: 180-186
- Konrad K. and Truffer B. (2006), « The coupling of spin-offs and research institutions in the triangle of policy, science and industry. An international comparison », WZB – Discussion paper, 33p.
- Krakowski V. 2016. Intégration du renouvelable et stratégie de déploiement du réseau électrique : réconciliation d'échelles spatio-temporelles dans des exercices prospectifs de long terme. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2016
- Kreimer P. (2003), « CANA (Connaissance applicable non appliquée) et les régimes de production des connaissances dans la science périphérique », AISLF, Journées GT6 « Science, innovation, technologie et société », Dijon, 29-31 janvier
- Krey, V., Riahi, K. (2009) —Implications of delayed participation and technology failure for the feasibility, costs, and likelihood of staying below temperature targets—Greenhouse gas mitigation scenarios for the 21st century” *Energy Economics* 31: S94-S106
- Larédo P. et Mustar P. (2004), « La recherche publique en France : évolutions et enjeux », *Le Banquet*, n° 19, pp. 95-113
- Legait B. (2003), Edito de la Lettre de l’Ecole des Mines de Paris, n° 114, février
- Luckow, P., Wise, M., Dooley, J.J., Kim, S., 2010. Large-scale utilization of biomass energy and carbon dioxide capture and storage in the transport and electricity sectors under stringent CO<sub>2</sub> concentration limit scenario. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4, 865-877.
- Luomi, M. (2016). Is the Paris Agreement a success and what does it mean for the energy sector?, *Oxford Energy Forum*, Issue 105, May, 4-7.
- den Elzen M., P. Lucas, D. van Vuuren, « Abatement costs of post-Kyoto climate regimes’’, *Energy Policy*, 33, 2005, pp. 2138-2151

McKinsey, Carbon Capture and Storage : Assessing the Economics, 2008, 53p

Michael K., Allinson A., Golab A., Sharma S. and Shulakova V. “CO2 storage in saline aquifers II – experience from existing storage operations”, Energy Procedia, 2009 (b);Volume 1, Issue 1: 1973-1980.

Michael K., Arnot M., Cook P., Ennis-King J., Funnell R., Kaldi J., Kirste D. and Paterson L., “CO2 storage in saline aquifers I – current state of scientific knowledge”, Energy Procedia, 2009 (a),Volume 1, Issue 1, 3197-3204.

Mori; 2012. An assessment of the potentials of nuclear power and carbon capture and storage in the long-term global warming mitigation options based on Asian Modeling Exercise scenarios. Energy Economics.

Mustar P. (2006), « Innovations in Policies to Foster the Creation of University Spin-Off Firms. An European comparison: France and the United Kingdom », Technology Transfer Society Conference, Georgia Tech, Atlanta, 27-29 september, 14p.

NACSA, First Edition. 2012, 52p. <https://www.netl.doe.gov/File%20Library/Research/Carbon-Storage/NACSA2012.pdf> (last visited August 29, 2016).

Nelson R. R. (1959), « The simple economics of basic scientific research », Journal of Political Economy, vol. 67, June, pp. 297-306, in ROSENBERG N. (1971), The economics of technological change, Penguin Books Ltd, Harmondsworth, Middlesex, England, pp. 148-163

Netzer N. and Steinhilber J. (EDS.), 2011. The end of nuclear energy? International perspectives after Fukushima. Perspective, Friedrich Ebert Stiftung, July. 79p.

Nowotny H. (2001), [en ligne], « Le potentiel de la transdisciplinarité », <http://www.interdisciplines.org/interdisciplinarity/papers/5/language/fr>, (page dernièrement consultée en octobre 2007 mais plus disponible depuis)

Obersteiner, M., Azar, C., Kauppi, P., Möllersten, K., Moreira, J., Nilsson, S., 2001. Managing Climate Risk. Science 294, 786–787.

OCDE (1996), L'économie fondée sur le savoir, Rapport de l'OCDE, 47p.

OMPI (2005), « Les brevets sont une véritable mine d'informations », Revue de l'OMPI, janvier-février, pp. 8-11

ONU, 2009 ; World Banque, 2009 ; WEO, 2009 ; WEC, 2007; World Atlas, 2007 ; EIA, 2008 ; BP, 2009

Peterson, E.B., Schleich, J., Duscha, V. (2011) —Environmental and economic effects of the Copenhagen pledges and more ambitious emission reduction targets|| Energy Policy 39, 3697–3708.

Postic S. (2015). Long-term energy prospective modeling for South America - Application to international climate negotiations, Environmental Engineering. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. <NNT: 2015ENMP0048>

Postic S., Selosse S. and Maïzi N.(2016). Energy sector contribution to regional climate action: The case of Latin America”, WP n°2016-02-20, 24p.

- Rai V., Victor D.G., Thurber M.C. (2010). Carbon capture and storage at scale: Lessons from the growth of analogous energy technologies, *Energy policy*, 38, 4089-4098.
- Saveyn, B., Van Reagermorter, D., Ciscar, J.C. (2011) —Economic analysis of the climate pledges of the Copenhagen Accord for the EU and other major countries| *Energy Economics* 33, S34-S40
- Spiegel R.P. (2015a). Deep decarbonization study reveals multiple pathways to carbon goal, Online: <http://www.triplepundit.com/2015/12/deep-decarbonization-study-reveals-multiple-pathways-carbon-goal/#>, (last visited 10/15/2016).
- Spiegel R.P. (2015b). Off-the-shelf technology can halt climate change now, Online: <http://www.triplepundit.com/special/cop21/off-the-shelf-technology-can-halt-climate-change-now/>, (last visited 10/15/2016).
- Stern, N., Taylor, C. (2010) —What do the appendices to the Copenhagen Accord tell us about global greenhouse gas emissions and the prospects for avoiding a rise in global average temperature of more than 2.8°C?| Centre for Climate Change Economics and Policy Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment
- Tavoni and van der Zwaan, 2011. Nuclear Versus Coal plus CCS: A Comparison of Two Competitive Base-Load Climate Control Options. *Environmental Modeling and Assessment* 16, 431-440.
- van den Broek, M., Brederode E., Ramirez A., Kramers L., van der Kuip M., Wildenborg T., Turkenburg W. and Faaij, A., “Designing a cost-effective CO<sub>2</sub> storage infrastructure using a GIS based linear optimization energy model, *Environmental Modelling and Software*, 2010, 25:1754-1768
- van den Broek, M., Veenendaal, V., Koutstaal, P., Turkenburg, W., Faaij, A., 2011. Impact of international climate policies on CO<sub>2</sub> capture and storage deployment: Illustrated in the Dutch energy system. *Energy Policy* 39, 2000–2019.
- van Vliet, J. et al. (2012) —Copenhagen Accord Pledges imply higher costs for staying below 2°C warming| *Climatic Change* 113, 551-561
- van Vuuren, D., Den Elzen, M., Lucas, P., Eickhout, B., Strengers, B., et al., 2007. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change* 81, 119-159.
- van Vuuren, D.P., Stehfest, E., den Elzen, M.G., van Vliet, J., Isaac, M. (2010) —Exploring IMAGE model scenarios that keep greenhouse gas radiative forcing below 3 W/m<sup>2</sup> in 2100, *Energy Economics* 32, 1105-1120
- van Vuuren, D., van Vliet, J., Stehfest, E., 2009. Future bio-energy potential under various natural constraints. *Energy Policy* 37, 4220-4230.
- Vasakova L., 2011. *Energy Roadmap 2050*. DG ENER, European Commission, December.
- Woronoff D. (1998), *Histoire de l'industrie en France*, Le Seuil, Collection Points Histoire, 704p.
- Wright R., Mourits F., Beltran Rodriguez L., Davila Serrano M., “The first North American Carbon Storage Atlas”, *Energy procedia*, Volume 37, 2013, pp.5280-5289.

Wuppertal Institute, CCS Global: Prospects of carbon capture and storage technologies (CCS) in emerging economies. Part II: Country Study India, Final Report, 2012a, GIZ-PN 2009.9022.6, 30 June 2012, 179p.

Wuppertal Institute, CCS Global: Prospects of carbon capture and storage technologies (CCS) in emerging economies. Part III: Country Study China, Final Report, 2012b, GIZ-PN 2009.9022.6, 30 June 2012, 214p.

Wuppertal Institute, CCS Global: Prospects of carbon capture and storage technologies (CCS) in emerging economies. Part IV: Country Study South Africa, Final Report, 2012c, GIZ-PN 2009.9022.6, 30 June 2012, 179p.

ZEP, The costs of CO<sub>2</sub> Storage: Post-demonstration CCS in the EU, 2011, 42p, <https://www.globalccsinstitute.com/publications/costs-co2-storage-post-demonstration-ccs-eu>

ZEP, The costs of CO<sub>2</sub> Transport: Post-demonstration CCS in the EU, 2011, 53p, <https://www.globalccsinstitute.com/publications/costs-co2-transport-post-demonstration-ccs-eu> (last visited August 29, 2016).

Zhu L., Duan H-B. and Fan Y., “CO<sub>2</sub> mitigation potential of CCS in China – an evaluation based on an integrated assessment model”, Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 934-947

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Comparaison des domaines couverts par les brevets demandés ou non par une entreprise	24
Figure 2 : Les réseaux technologiques dans les brevets CNRS/Entreprises entre 1995 et 2005	24
Figure 3 : Les collaborations dans les co-demandes de brevets CNRS/Entreprises	25
Figure 4: Représentation synthétique du système énergétique de référence de TIAM	44
Figure 5 : Extrait du Système Énergétique de Référence concernant la filière biodiesel dans TIAM-FR	45
Figure 6: Les demandes de services énergétiques de TIAM et leurs déterminants	46
Fig. 7: Maturité de l'évaluation régionale du potentiel de stockage du carbone	51
Figure 8 : Biomasse et capture du carbone (Ricci, 2012).	58
Figure 9: Evolution de la consommation d'électricité en Afrique par sous-région	62
Figure 10: Scénario de vitesse d'accès à l'électricité identique	63
Figure 11: Mix électrique africain par sous-régions dans un scénario BAU (PJ)	64
Figure 12: Mix électrique africain en Afrique sub-saharienne dans un scénario BAU et dans un scénario de vitesse contrastée d'accès (PJ)	64
Figure 13: Scénario d'accès contrasté à l'électricité	65
Figure 14 : Production d'électricité (PJ) en Afrique dans le BAU et le scénario climatique	65
Figure 15 : Production d'électricité (PJ) en Afrique du Nord dans le BAU et le scénario climatique, suivant des contraintes d'accès à l'électricité	66
Figure 16 : Production d'électricité (PJ) en Afrique sub-saharienne dans le BAU et le scénario climatique, suivant des contraintes d'accès à l'électricité	66
Figure 17 : Production d'électricité (PJ) en Afrique du Sud dans le BAU et le scénario climatique, suivant des contraintes d'accès à l'électricité	67
Figure 18 : Première expérimentation d'échanges de données entre les modèles TIAM-FR et IMACLIM-R	70
Figure 19 : Demandes de services énergétiques dans le secteur résidentiel (EJ)	71
Figure 20: Emissions mondiales de CO <sub>2</sub> (Gt)	72

Figure 21: Emissions mondiales de CO <sub>2</sub> par secteur (Gt)	73
Figure 22 : Consommation mondiale d'énergie primaire (mtep)	74
Figure 23 : Consommation mondiale d'énergie finale (mtep)	74
Figure 24 : Production mondiale d'électricité (TWh)	75
Figure 25 : Emissions mondiales de CO <sub>2</sub> eq	82
Figure 26 : Trajectoires de réduction d'émissions de GHG par groupe de pays	83
Figure 27: Emissions de CO <sub>2</sub> dans les scénarios régionaux de long terme (Gt CO <sub>2</sub> )	85
Figure 28: Contribution par groupe de pays à l'effort d'atténuation de CO <sub>2</sub> dans les scénarios UNFCCC et BAU (Gt CO <sub>2</sub> )	86
Figure 29: Contribution par groupe de pays à l'effort de réduction des émissions de CO <sub>2</sub> dans le scénario IND/FDC95-DEV30 (Gt CO <sub>2</sub> )	87
Figure 30: Trajectoires d'émissions de GES à long terme (Gt)	91
Figure 31: Contribution régionale aux réductions d'émissions de GES (Gt) dans les scénarios INDCs	92
Figure 32: Contribution régionale aux réductions d'émissions de GES (Gt) dans les scénarios UNFCCC	93
Figure 33: Production mondiale d'électricité par scénario global (PJ) – Trajectoires vers un monde décarbonisé	96
Figure 34: Production mondiale d'électricité par scénario (PJ) – Trajectoires issues de l'Accord de Paris	96
Figure 35: Production mondiale d'électricité par scénario (PJ) – Sensibilité à la disponibilité de la BECSC	97
Figure 36: Production d'électricité dans les pays industrialisés (PJ) en 2050	98
Figure 37: Production d'électricité par des centrales avec CSC en Inde et en Chine (PJ)	98
Figure 38: Production d'électricité dans les pays en développement (PJ)	99
Figure 39: Production électrique européenne des centrales avec CSC (TWh)	103
Figure 40 : Emissions mondiales de CO <sub>2</sub> (Gt)et production mondiales d'électricité (TWh)	108
Figure 41. Mix électrique africain (PJ)	136

## LISTE DES TABLES

Table 1 : Variables créées à partir des données bibliographiques des brevets récoltées	23
Table 2: Potentiel de stockage initial supposé dans TIAM-FR	50
Table 3: Potentiel de stockage du carbone par type de site et par localisation	53-54
Table 4: Coûts de transport du carbone et coefficients régionaux	55
Table 5: Electricity mix (%) by scenario	56
Table 6 : Différentes réalités économiques et énergétiques au sein de l’Afrique	62
Table 7 : Principales spécifications des modèles TIAM-FR et IMACLIM-R	69
Table 8 : Scénario analysés	71
Table 9 : Scénario régional de réduction d’émissions de GES (Cibles basses à 2020)	81
Table 10 : Contraintes de réduction d’émissions de GES soumis dans le cadre des INDCs	90
Table 11 : Contraintes de réduction d’émissions de GES d’ici 2050	90
Table 12 : Coût d’abattement régional du système et coût marginal du carbone	106
Table 13 : Coûts marginaux du carbone suivant les scénarios (USD/tCO <sub>2</sub> )	108
Table 14 : Synthèse des publications et communications	122
Table 15 : Référencement des revues dans lesquelles les articles ont été publiés :	122

## LISTE DES ACRONYMES

AIE	Agence internationale de l'énergie
BAU	Business as usual
BECCS	Bioenergy and Carbon Capture and Storage
BECSC	Bioénergie associée à la capture et la séquestration du carbone
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CCS	Carbon Capture and Storage
CH4	Méthane
CIB	Classification internationale des brevets
CO2	Dioxyde de carbone
COP	Conferences of Parties
CSC	Capture et séquestration du carbone
CSP	Concentrated solar power
DEA	Diplôme d'études approfondies
DPI	Droits de propriété intellectuelle
ECBM	Enhance coal bed methane
EFOM	Energy flow optimization model
EOR	Enhanced oil recovery
EPST	Établissements publics à caractère scientifique et technologique
ETSAP	Energy technology systems analysis program
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GCTI	
GES	Gaz à effet de serre
GNL	Gaz naturel liquéfié
GW	Gigawatt
H2	Dihydrogène
HT	Hors taxe
IGCC	Integrated gasification combined cycle
INDCs	Intended nationally determined contributions
Kt	Kilotonne
MDP	Mécanisme de développement propre
Mt	Megatonne
N2O	Protoxyde d'azote
O2	Dioxygène
OEM	Original Equipment Manufacturer

PACA	Provence-Alpes-Côte d'Azur
PIB	Produit intérieur brut
PJ	Petajoule
PME	Petites et moyennes entreprises
PPM	Partie par million
RAP	Récupération assistée du pétrole
RES	Reference Energy System
TIAM	TIMES Integrated Assessment Model
TWh	Terawatt-heure
UMR	Unité mixte de recherche
UNFCCC	United Nations framework convention on climate change
USD	Dollar US

## ANNEXES

### ANNEXE 1

SELOSSE Sandrine and RICCI Olivia (2014), Achieving negative emissions with BECCS (bioenergy with carbon capture and storage) in the power sector: New insights from the TIAM-FR TIMES Integrated Assessment Model France) model, *Energy*, Volume 76, 1, November 2014, Pages 967-975; <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01069978>

### ANNEXE 2

RICCI Olivia and SELOSSE Sandrine (2013), Global and regional potential for bioelectricity with carbon capture and storage, *Energy Policy*, 52, 689-698  
<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00749900>

### ANNEXE 3

SELOSSE Sandrine, RICCI Olivia and MAÏZI Nadia (2013), Fukushima's impact on the European power sector: The key role of CCS technology, *Energy Economics*, Volume 39, September, pages 305-312  
<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00832394>

### ANNEXE 4

RICCI Olivia and SELOSSE Sandrine (2013), A cost analysis of the Copenhagen emission reduction pledges, *Economics Bulletin*, Vol.33, N°1, pp. 764-777  
<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00802087>

## TABLE DES MATIERES

<i>Sommaire</i> .....	3
<i>Préambule</i> .....	5
<i>Curriculum vitae</i> .....	7
<b>PARTIE I : PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE</b> .....	<b>11</b>
<i>Chapitre 1 : Mon travail de thèse en Economie de la Science et de l’Innovation</i> .....	12
<i>I. Recherche sur l’organisation des activités scientifiques et les relations science industrie</i> .....	13
A. L’institutionnalisation de la recherche publique .....	15
B. Un environnement de production des connaissances scientifiques en mutation .....	19
C. L’analyse des brevets CNRS-Entreprises.....	21
<i>II. Les projets de recherche</i> .....	30
A. Projet OEM « Les PME et l’exportation : la nécessité d’une politique industrielle horizontale » - 2008.....	31
B. Programme « Sciences Bio-médicales, Santé et Société » 2003-2006.....	32
C. Projet européen TELL “Technological Knowledge and Localised Learning: What Perspectives for a European Policy ?” – 2002-2004 .....	34
D. Projet « La structuration des réseaux d’entreprises », ORSEU, Villeneuve d’Ascq – 2000-2001 .....	37
<i>Chapitre 2 : Mon projet de recherche en Prospective des Politiques Energie-Climat</i> .....	38
<i>I. Développement des outils de modélisation prospective</i> .....	39
A. Le modèle TIAM – TIMES Integrated Assessment Model .....	41
B. Recalibrage, mise à jour des données et développement du modèle TIAM-FR.....	47
C. Développement des filières technologiques : la place du charbon et de la biomasse dans la transition vers un système décarboné et le développement des technologies de capture et séquestration du carbone .....	49
1. Capture et séquestration du carbone : l’importance des potentiels de stockage du carbone et des coûts de transport .....	50
2. Capture et séquestration du carbone appliquées aux filières biomasses : la question des émissions négatives de carbone.....	57
D. Représentation régionale du modèle : Sous-régionalisation du secteur électrique africain et implémentation de la problématique de l’accès à l’énergie.....	61
E. L’approche combinée Bottom-up/Top down.....	68

<i>II. Investigations de recherche</i> .....	78
<i>A. Décryptage des engagements climatiques post-Kyoto</i> .....	79
1. COP 15, 2009 – L'accord de Copenhague .....	79
2. La responsabilité commune et différenciée et la question de l'équité.....	84
3. COP 21, 2015 – L'accord de Paris .....	88
<i>B. Evolution des systèmes énergétiques</i> .....	94
1. La réponse technologique régionale à la transition bas-carbone issue de l'Accord de Paris ....	95
2. L'impact de Fukushima sur le secteur électrique européen.....	101
<i>C. Coût des politiques climatiques</i> .....	105
<i>Chapitre 3 : Mes perspectives de recherche</i> .....	110
<i>I. Analyse des engagements climatiques internationaux d'atténuation des émissions de GES</i> .....	111
<i>A. Analyse des accords climatiques et extensions aux trajectoires de 1,5°C</i> .....	111
<i>B. Enquête Actions Climat</i> .....	113
<i>C. Modification de la fonction objectif de TIAM-FR</i> .....	114
<i>II. Analyse des défis liés au développement technologique</i> .....	115
<i>A. Potentiels d'une biomasse durable, clé de voûte du développement de la filière BCSC ?</i> .....	115
<i>B. Et en dehors du secteur électrique et de la CCS ?</i> .....	115
<i>III. Analyse de défis régionaux</i> .....	118
<i>A. Accès à l'énergie en Afrique</i> .....	118
<i>B. Le marché carbone en Chine</i> .....	118
<i>C. Le secteur des transports au Brésil</i> .....	119
<i>D. Focus Europe</i> .....	120
<i>PARTIE II : PRODUCTION SCIENTIFIQUE ET STRATEGIE DE RECHERCHE</i> .....	121
<i>Chapitre 4 : Production scientifique</i> .....	122
<i>A. Articles dans des revues internationales avec comité de lecture répertoriées A l'HCERES</i> .....	123
<i>B. Articles dans des revues internationales avec comité de lecture non répertoriées A l'HCERES</i> .....	123
<i>C. Ouvrages et chapitres d'ouvrage</i> .....	124
<i>D. Conférences internationales avec comité de sélection et Actes</i> .....	124
<i>E. conférences nationales avec comité de sélection et Actes</i> .....	126
<i>F. Conférences invitées</i> .....	126

G.	<i>Conférences internationales avec comité de sélection</i> .....	127
H.	<i>Conférences internationales sans comité de sélection</i> .....	128
	1. <i>Interventions dans des sessions auto-organisées dans le Stream Long Term Planning in Energy, Environment and Climate” organisé par Nadia Maïzi, MINES ParisTech, CMA, .....</i>	128
	2. <i>Workshop internationaux de la communauté de modélisateur</i> .....	128
	3. <i>Workshop internationaux de restitution de projets européens</i> .....	129
I.	<i>Conférences nationales sans comité de sélection</i> .....	130
J.	<i>Working Papers</i> .....	130
K.	<i>Rapports de projets</i> .....	131
L.	<i>Autres publications</i> .....	131
	1. <i>Articles soumis en cours de révision</i> .....	131
	2. <i>Posters</i> .....	132
	3. <i>Traductions publiées</i> .....	132
	4. <i>Newsletters dans la Revue électronique de l’ADMEO (Association Doctorale Marché et organisation) – La Newsletter de l’ADMEO</i> .....	132
M.	<i>Séminaires internes</i> .....	133
	<i>Chapitre 5 : Stratégie de recherche</i> .....	134
I.	<i>Les collaborations de recherche</i> .....	134
	A. <i>Consortium ETSAP-TIAM</i> .....	134
	1. <i>Phase 1 – 2011-2013 - Consortium ETSAP-TIAM sous la coordination de Markus BLESL, IER, Université de Stuttgart</i> .....	134
	2. <i>Phase 2 – 2013-2015 - Consortium ETSAP-TIAM sous la coordination de Markus BLESL, IER, Université de Stuttgart</i> .....	136
	3. <i>Phase 3 – 2016-2017 – Forum collaboratif ETSAP-TIAM sous la coordination de Kenneth KARLSSON, DTU, Université Technique du Danemark</i> .....	137
	B. <i>Centre International de Recherche sur l’Environnement et le Développement (CIRED), Ecole des Ponts ParisTech</i> .....	137
	C. <i>Laboratoire d’Economie d’Orléans (LEO), Université d’Orléans</i> .....	138
	D. <i>Centre d’Economie et de Management de l’Océan Indien (CEMOI), Université de La Réunion</i> .....	139
	E. <i>Groupe de Recherche en Droit, Economie et Gestion (GREDEG), Université de la Côte d’Azur</i> .....	140

<i>II. Les projets de recherche</i> .....	141
<i>A. Les projets en cours et achevés</i> .....	141
1. Chaire Modélisation prospective au service du développement durable.....	141
2. Projet ETSAP : Enhancement of ETSAP E-TechDS database with cooling technology parameters for power plants – 2016 .....	145
3. Projet MUFFINS : Measuring nudges’ efficacy on energy consumption - 2016.....	146
4. Projet ECOTYPE « Prospective, aménagement du territoire, développement durable et vision artistique », 2011-2013.....	147
<i>B. Les projets soumis mais rejetés</i> .....	149
1. 2016 – Projet G-TlalocME: Geo-Thermal Cooperation Mexico-Europe .....	149
2. 2015 – Projet OSS 974 : Optimisation des Systèmes énergétiques Soutenables : Vers l'autonomie énergétique de l'île de La Réunion.....	151
3. 2014 – Projet PIVERT : La Politique Industrielle Verte dans l'Arène Commerciale Internationale.....	152
4. 2014 – Projet OSS 974 : Optimisation des Systèmes énergétiques Soutenables : Vers l'autonomie énergétique de l'île de La Réunion.....	153
5. 2013 – Evaluation of Bioenergies with Carbon Capture and Storage (BECCS) potential using the integrated energy and economic model TIAM-FR.....	153
6. 2013 – Projet AGIR : La transition énergétique, nouvel enjeu industriel et commercial.....	154
7. 2013 – A network to improve the transparency and understanding of energy system models	155
8. 2012 – Platform for coordinated networking for ETSAP-TIAM energy system model .....	156
<i>C. Rayonnement et activités scientifiques</i> .....	156
1. <i>Organisation de conférences</i> .....	157
a. Chaire Modélisation prospective au service du développement durable.....	157
b. Conférences sur les Changements Climatiques des Nations Unies (UNFCCC) .....	158
c. European Conference on Operational Research (EURO).....	159
d. Les workshops de l'ETSAP.....	159
2. <i>Membres d'associations et de communautés scientifiques</i> .....	159
3. <i>Participation à des comités de lecture de journaux scientifiques internationaux</i> .....	160
4. <i>Participation à des comités d'experts nationaux</i> .....	160
5. <i>Séjours invités au sein de laboratoires de recherche</i> .....	161
6. <i>Participation à des actions nationales de dissémination et vulgarisation scientifiques</i> .....	161

a. Le programme MEDITES .....	161
b. La Fête de la Science.....	162
c. Les forums et salons du métier de chercheur à destination du grand public .....	163
<i>Chapitre 6 : Encadrement d'étudiants .....</i>	<i>164</i>
<i>A. Encadrement de doctorants .....</i>	<i>164</i>
1. Modélisation prospective TIMES pour l'Amérique du Sud.....	164
2. Modélisation prospective des bioénergies dans TIAM.....	165
<i>B. Supervision de post-doctorants.....</i>	<i>168</i>
1. Capture et stockage géologique du carbone à partir de la biomasse .....	168
2. Consommation et maîtrise de l'énergie ; Gestion des déchets.....	169
<i>C. Encadrement d'élèves du Mastère Spécialisé Optimisation des Systèmes Energétiques (OSE)....</i>	<i>169</i>
1. Tutorat académique.....	170
2. Encadrement de stagiaires OSE.....	171
a. Modélisation TIAM/Monde.....	171
b. Implémentation des usages de l'eau dans le modèle énergétique TIAM-FR .....	171
c. Critical analysis of ECF's ROADMAP 2050 .....	172
d. Prospective carbone et efficacité énergétique .....	172
e. Energy efficiency solutions for residential and commercial applications in Europe. A prospective study to 2035.....	173
f. Prospective, aménagement du territoire, développement durable et vision artistique .....	174
g. Recalibrage du modèle TIAM-FR.....	174
<i>D. Encadrement d'étudiants.....</i>	<i>175</i>
1. Capture et Séquestration du Carbone .....	175
<i>Bibliographie.....</i>	<i>176</i>
<i>Liste des figures.....</i>	<i>184</i>
<i>Liste des Tables .....</i>	<i>186</i>
<i>Liste des acronymes .....</i>	<i>187</i>
<i>Annexes.....</i>	<i>189</i>