UNIVERSITE CÔTE D'AZUR

Habilitation à Diriger les Recherches
École Doctorale
Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication

Discipline n°61 :
Génie Informatique, automatique et traitement du signal

Présentée par

Dr. GUERASSIMOFF Gilles
Maître assistant
Centre de Mathématiques Appliquées - MINES ParisTech

Systèmes énergétiques : contrôle modélisation et prospective

Soutenue le 29 mai 2017, devant le jury :

Georges LE PALEC	Professeur, Université d'Aix-Marseille	Président
François MIRABEL	Professeur, Université de Montpellier	Rapporteur
Bruno PEUPORTIER	Directeur de Recherche, Mines ParisTech	Rapporteur
Philippe POGGI	Professeur, Université de Corse	Rapporteur
Philippe BOURNOT	Professeur, Université d'Aix-Marseille	Examinateur
Nadia MAÏZI	Professeur, Mines ParisTech	Examinateur

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS **9**

PARCOURS ACADÉMIQUE **11**

CURRICULUM VITAE 13
EMPLOIS OCCUPÉS 14
DESCRIPTION DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE 15
CHRONOLOGIE DES CONTRATS DE RECHERCHES 19
FONCTIONS ADMINISTRATIVES 20
Responsabilités de formations *20*
Autres responsabilités *20*
ENSEIGNEMENTS 21
Enseignement à Mines ParisTech *21*
Enseignements à l'extérieur *21*
Enseignements de vulgarisation *22*
LE MASTÈRE SPÉCIALISÉ® OSE (MONTAGE, ORGANISATION, SUIVI, DIRECTION) 23
ENCADREMENTS DE THÈSES ET DE THÈSES PROFESSIONNELLES 25
Doctorats (3) *25*
Participations à des jurys de thèse (2) *25*
Thèses professionnelles de Mastères Spécialisés (71) *25*
Stages de Master (6) *28*
Autres Stages (2) *29*
PUBLICATIONS, CONGRÈS, RAPPORTS 30
Ouvrages de librairie *30*
Articles dans des revues à comité de lecture *30*
Articles dans des colloques avec comités de lecture. *30*
Communications dans des colloques avec comités de lecture. *32*
Autres communications *32*
Rapports contractuels et autres rapports *33*
Mémoires de travaux diplômants *34*

TRAVAUX SCIENTIFIQUES **35**

INTRODUCTION 37
LA PROSPECTIVE DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES 37
La prospective énergétique long terme *37*
Le générateur de modèle TIMES *40*
Systèmes renouvelables *41*
- Introduction 41
- Intégration des EnR dans un modèle de prospective 41
- Résultats du projet RES2020 43
- Zoom sur la biomasse 45
- Caractérisation et évaluation de la ressource 46
- Technologies représentées 47
- Scenarios étudiés 47
- Résultats du projet VALERBIO 48
- Conclusions 51

Systèmes industriels *52*
- Segmenter pour une représentation pertinente 53
- Un choix de modélisation adapté 56
  - Cas des IGCE 56
  - Cas de l'Industrie Diffuse (ID) 60
- Analyse des futurs possibles 64
  - Réponse des IGCE à la contrainte environnementale 65
  - Les Pompes à chaleurs : solution efficace pour une économie d'énergie dans l'industrie agroalimentaire ? ... 66

Conclusion et perspectives *70*

DÉVELOPPEMENTS ALGORITHMIQUES POUR L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE 72
Introduction *72*
Genèse *72*
L'efficacité énergétique dans les bâtiments *73*
❖ État des Lieux 73
❖ Mesurer pour mieux agir 74
❖ Traitement des questionnaires et données des projets 75
❖ Extension au secteur tertiaire 78
➢ Comment se passer de la simulation ? 79
➢ Méthodologie d'élaboration des algorithmes 81
➢ Premiers retours 84
❖ Données issues de capteurs : comment les envisager pour mieux les valoriser ? 85
➢ Une jungle de protocoles 85
➢ Mise en place de notre Fablab 87
❖ Modélisation et Contrôle à partir de données recueillies 90
➢ Le datamining au service de l'efficacité énergétique du bâtiment 91
➢ L'identification des bâtiments 91
➢ Les réseaux neuronaux, une souplesse supplémentaire 92
➢ Exemple de l'intermittence forte 97
➢ Le Machine Learning pour le contrôle 98
Conclusions et perspectives *99*
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 100
BIBLIOGRAPHIE 103
ANNEXES 111

ADEME ..... Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AIE ..... Agence Internationale de l'Energie
AHP ..... Analytic Hierachy Process
ANR ..... Agence Nationale de la Recherche
ARMAX ..... Auto Regressive Moving Average with eXternal inputs
ARX ..... Auto Regressive model with eXternal inputs
BaU ..... Business as Usual
BEPOS ..... Bâtiment à Energie POSitive
BECI ..... Berkeley Energy and Climate Institute
BIBE ..... Bois Industrie Bois Energie
BO ..... Bois d'œuvre
BTL ..... Biomass To Liquid
CCS ..... Carbone Capture and Storage
CEREN ..... Centre d'Études et de Recherche Économiques sur l'éNergie
CMA ..... Centre de Mathématiques Appliquées
CRE ..... Commission de Régulation de l'Énergie
CVC ..... Chauffage Ventilation Climatisation
DJU ..... Degré Jour Unifié
DOE ..... Departement Of Energy
ED ..... Ecole Doctorale
EFOM ..... Energy Flows Optimization Model
ETSAP ..... Energy Technology Systems Analysis Program
FCBA ..... Institut Technologique de la Forêt, de la Cellulose, du Bois-construction et de l'Ameublement
FOD ..... Fioul Domestique
FOL ..... Fioul Lourd
GICC ..... Gestion et Impacts du Changement Climatique
GPL ..... Gaz de Pétrole Liquéfié
GTB ..... Gestion Technique du Bâtiment
GTEB ..... Gestion Technique et Énergétique du Bâtiment
GTC ..... Gestion Technique Centralisée
HLC ..... Heat Loss Coefficient
IA ..... Intelligence Artificielle
IAA ..... Industrie Agro Alimentaire
IAM ..... Intergrated Assessment Model
IFP ..... Institut Français du Pétrole
INRA ..... Institut National de la Recheche Agronomique
IoT ..... Internet of Things
IPI ..... Indice de Production Industrielle
MARKAL ..... MARket ALocation
MB ..... Menu Bois
MoU ..... Memorendum of Understanding
NRMSE ..... Normalized Root Mean Square Error
OE ..... Output Error
PAC ..... Pompe à chaleur
PACTE ..... Programme d'Action pour la qualité de la Construction et la Transition Energétique
PCI ..... Pouvoir Calorifique Inférieur
PREBAT ..... Programme de Recherche sur l'Energie dans les BATiments
RES ..... Reference Energy System

STD..... Simulation Thermique Dynamique
STIC.....Science et Technologie de l'Information et de la Communication
SE ..... Système Expert
TCR.....Taillis à Courte Rotation
TIAM .....TIMES Integrated Assessment Model
TIMES..... The Integrated Markal Efom System
UC ..... University of California
UNB.....Ultra Narrow Band
VP.....Valeur de Production
VA ..... Valeur Ajoutée
VAV .....Variable Air Volume

Figure 1 : représentation schématique des grandes approches de modélisation prospectives. (Seck, 2012)..... 40
Figure 2 : consommation d'énergies renouvelables pour l'EU 27 + Norvège et Islande 43
Figure 3 : Production d'électricité renouvelable au niveau EU27+Norvège et Islande..... 44
Figure 4 : Répartition des usages des sources EnR pour la France..... 44
Figure 5 : Système énergétique de référence du projet Valerbio 46
Figure 6 : Production de biocarburants pour P1..... 49
Figure 7 : Production de biocarburants pour P2/P3 49
Figure 8 : Allocation de la paille pour la demande D1..... 49
Figure 9 : Production d'électricité à partir de biomasse pour la demande D1 49
Figure 10 : Mobilisation de la ressource agricole pour une demande D1 50
Figure 11 : Mobilisation de la ressource forestière pour une demande D1..... 50
Figure 12 : Production biocarburants pour P2/P3 et D2 50
Figure 13 : Mobilisation de la ressource agricole pour D2 50
Figure 14 : Défaillance de la ressource bois scénario D2..... 51
Figure 15 : Défaillance de la ressource bois scénario D3..... 51
Figure 16 : Répartition des IGCE dans le cadre de la modélisation retenue (Djemaa, 2009) 53
Figure 17 : Périmètre industriel retenu (Seck, 2012) 55
Figure 18 : Représentation schématique des consommations énergétiques dans l'industrie..... 57
Figure 19 : Consommations par combustible du secteur IGCE(Djemaa, 2009) 57
Figure 20 : Représentation de la répartition thermique possible (Djemaa, 2009) 57
Figure 21 : Architecture du modèle industrie IGCE (Djemaa, 2009) 58
Figure 22 : Système énergétique de référence du secteur de l'acier (Djemaa, 2009) 60
Figure 23 : Synoptiques de deux secteurs de l'ID (NACE 1533 et NACE 1511) (Seck, 2012) 61
Figure 24 : Schéma simplifié du RES générique de l'industrie diffuse (Seck, 2012) 62
Figure 25 : Schéma du système énergétique de référence détaillé de l'industrie diffuse..... 64
Figure 26 : Structure de la consommation de l'IGCE en France en 2050 pour les 3 scénarios 65
Figure 27 : Structures technologiques satisfaisants aux contraintes des scenarios étudiés 66
Figure 28 : Pyramide des indicateurs (Seck, 2012)..... 67
Figure 29 : Consommation d'énergie finale du secteur de l'IAA (scénario tendanciel et scénario PAC) 68
Figure 30 : Potentiels de récupération des PAC par sous-secteur de l'IAA 69
Figure 31 : Potentiel de récupération des PAC par sous-secteur de l'IAA et par type d'usage..... 69
Figure 32 : Potentiel économique de substitution des PAC dans les 7 premiers sous-secteurs de l'IAA en 2020.. 70
Figure 33 : Répartition des besoins par tranches de température et par sous-secteur dans l'IAA..... 70
Figure 34 : Principe du développement des outils pour le projet Gridteams..... 75
Figure 35 : Principe schématique d'un système expert 82
Figure 36 : Principe de fonctionnement de notre système expert..... 83
Figure 37 : Schéma de principe de notre Fablab (Saidi, 2016) 89
Figure 38 : Implémentation des capteurs et systèmes de collecte au CMA (Saidi, 2016) 90
Figure 39 : Schéma d'identification du bâtiment (Jebali, 2015)..... 91
Figure 40 : Comparaison de la température du bâtiment en été du modèle (en rouge) et des valeurs expérimentales (en noir) (Jebali 2015)..... 92
Figure 41 : Représentation schématique d'un modèle de neurone..... 93
Figure 42 : exemples de fonctions d'activation communes..... 94
Figure 43 : Schéma d'un réseau de neurone avec une couche de neurones cachée 94
Figure 44 : Schéma de composition du réseau de neurone retenu issu de Matlab. 95
Figure 45 : Droite de régression entre valeur cible et résultat du réseau de neurone 96
Figure 46 : Type de sous ensemble flou utilisé pour les températures..... 97
Figure 47 : Exemple de gains issus de l'implémentation d'un contrôle prédictif sur une VAV (Jebali 2016)..... 99

Table 1 : Comparaison entre CAH et K-Means (Seck et al., 2016)..... 56
Table 2 : Tableau des règles permettant l'évaluation du temps de relance en fonction des températures intérieure et extérieure 97
Table 3 : Nouveau tableau des règles incluant la prévision de température extérieure au début de la période de relance..... 97

AVANT-PROPOS

Ce document présente une synthèse de vingt années de recherche passées au sein de l'École des Mines de Paris sur son site de Sophia Antipolis. Suite à la soutenance de ma thèse de doctorat en 1997, j'ai poursuivi mes recherches au Centre d'Énergétique pendant quelques années avant de rejoindre le Centre de Mathématiques Appliquées suite au montage du Mastère Spécialisé en Optimisation des Systèmes Énergétiques.

Partant de la modélisation et du contrôle jusqu'à la prospective, je présente le cheminement de mes activités autour de systèmes énergétiques variés que j'ai pu étudier à divers niveaux. Ils représentent les fondements de mon travail d'enseignement et de recherche.

Ce manuscrit s'articule autour de deux parties :

- La première est dédiée au traditionnel parcours académique retraçant mes activités à travers diverses listes :
    - Curriculum Vitae
    - Synthèse de mes activités de recherche en spécifiant les trois axes qui ont jalonnés ce parcours, permettant un aperçu chronologique synthétique de mon rôle.
    - Liste des publications et communications diverses,
    - Activités d'enseignement,
    - Activités contractuelles,
    - Autres activités administratives et connexes
- La deuxième partie est consacrée à une présentation, illustrée d'exemples choisis de résultats obtenus, des travaux scientifiques que j'ai pu mener, diriger ou encadrer jusqu'à présent. Je terminerai par des perspectives pour les années à venir.
- En annexe j'ai ajouté trois articles publiés, chacun dans une thématique de recherche en cours.

Ces activités sont le fruit d'un travail collaboratif. Que ce soient les chercheurs, doctorants, stagiaires, mastériens, informaticiens, personnels techniques ou administratifs, tous ont largement contribué aux résultats qui sont présentés au sein de ce document.

Un simple remerciement ne serait pas suffisant, car au-delà de ce travail d'équipe, la qualité de vie en leur compagnie a contribué tout aussi largement au plaisir que j'ai à continuer l'aventure, j'espère pour longtemps encore…

Partie 1
PARCOURS ACADÉMIQUE

CURRICULUM VITAE

Données personnelles

M. Gilles GUERASSIMOFF
Né le : 3 août 1967 à Nice
Nationalité : française
Situation de famille : union libre, un enfant

Coordonnées professionnelles

MINES ParisTech
Centre de Mathématiques Appliquées
Rue Claude Daunesse
CS 10.207, F-06904 Sophia-Antipolis Cedex
☎ : 04 93 95 74 46
🖷 : 04 97 15 70 71
🖃 : gilles.guerassimoff@mines-paristech.fr

Parcours

- 2001 : Visiting position, Université de Berkeley.
  Post-Doctorat au sein du « Electrical Engineering and Computer Science », Pr. Edward. A. Lee.
- 1997 : Doctorat de l'École des Mines de Paris – Spécialité Énergétique, 1997
  Titre du mémoire : « *Étude numérique de jets d'airs horizontaux et de la brumisation en vue de leur couplage pour le rafraichissement d'enceintes habitables* »
  Directeur de thèse ; Jean-Jacques BEZIAN
  Jury : Francis ALLARD, Jean-Jacques BEZIAN, Dominique BLAY, Michel GSCHWIND, Christian INARD, André JAFFRIN, Jacques PANTALONI
- 1992 : D.E.A. Énergétique, Université de Nice – École des Mines de Paris
- 1991 : Maîtrise de Mécanique, Université d'Aix-Marseille II

Expérience professionnelle

- Depuis 2007 : Responsable du Mastère Spécialisé® OSE.
- Depuis 2002 : Chercheur au Centre de Mathématiques Appliquées, MINES ParisTech
- 1998-2006 : Chargé du Montage du Mastère Spécialisé® OSE, responsabilité pédagogique et administrative
- 1997-2001 : Chercheur au Centre d'Énergétique, MINES ParisTech

Divers

Langues étrangères
Anglais : courant

EMPLOIS OCCUPÉS

2002 à ce jour : MAITRE-ASSISTANT À L'ÉCOLE DES MINES DE PARIS

- *Rattachement au groupe de recherche en optimisation des systèmes énergétiques du Centre de Mathématiques Appliquées (CMA). Direction du Mastère Spécialisé® en Optimisation des Systèmes Énergétiques. Développement d'activités autour de la modélisation, de la prospective et du contrôle des systèmes énergétiques du secteur résidentiel/tertiaire. Responsable du Mastère Spécialisé® en Optimisation des Système Énergétiques.*

2001 (juin à septembre) : POST-DOC, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À BERKELEY

- *Participation sous la direction du professeur Edward A Lee (Directeur du département d'informatique et d'électronique de l'U.C. Berkeley) à la programmation d'un Domaine de flux de données dynamiques au sein du logiciel Ptolemy® développé par l'Université de Californie à Berkeley. Prise en main du domaine et participation à la transcription du code C++ en Java dans le logiciel dédié à la modélisation hétérogène de systèmes embarqués.*

1997-2001 : INGÉNIEUR DE RECHERCHE. À L'ÉCOLE DES MINES DE PARIS

- *Réalisation d'études et recherches en modélisation et contrôle des systèmes énergétiques au Centre d'Énergétique, montage de nouvelles formations pour l'École des Mines de Paris. Élaboration et mise en œuvre d'algorithmes de contrôle basés sur des techniques de logique floue dans le cadre du projet Européen OPTINER.*

1993-1994 : ACTIVITÉS PENDANT LE SERVICE NATIONAL

- *(Effectué du 01/10/93 au 01/10/94 en tant que sous-lieutenant du Génie de l'Armée de Terre, à la Sécurité Civile.)*
- *Chargé de différents cours aux officiers et sous-officiers pour la préparation des concours internes. Officier des Services Techniques, chargé de la prospection et de l'essai des matériels nouveaux utiles à la Sécurité Civile. Recherche de nouveaux matériels, réalisation de protocoles d'essai, et rédaction de rapports.*

1992-1997 : ATTACHÉ DE RECHERCHE DE L'ÉCOLE DE MINES DE PARIS

- *Préparation du Doctorat en énergétique.*
- *Développement du réseau de PC au sein du Centre d'Énergétique de Sophia Antipolis.*
- *Interruption d'un an pour effectuer mon Service National.*

DESCRIPTION DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE

Depuis la soutenance de ma thèse, j'ai pu initier et participer à plusieurs projets de recherches basés sur la thématique des systèmes énergétiques. J'ai ainsi pu être maître de thèse de trois doctorants et participer à l'encadrement de certains autres. Je synthétise succinctement et chronologiquement dans cette partie mon parcours de recherche jusqu'à ce jour selon trois axes.

1997-2001 *:* AXE DE RECHERCHE : MODÉLISATION DE SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES

Modélisation et contrôle de systèmes énergétiques au Centre d'Énergétique de Mines ParisTech.

- *Modélisation de systèmes*
- *Mise en œuvre d'algorithmes innovants*

Mes activités de recherche ont débuté avant ma soutenance de thèse par de la modélisation de systèmes énergétiques. En Poste au Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris, j'ai pu modéliser différents systèmes énergétiques en collaboration avec la direction de la recherche de Gaz De France de 1997 à 1999. Ce fut l'occasion d'étudier et de proposer des voies d'améliorations pour des systèmes comme, un détendeur de gaz à action piloté, un système de chauffage au gaz, un moteur au Gaz Naturel … La modélisation, puis la résolution des systèmes par des Modeleurs /Solveurs algébro différentiels, m'ont permis une première approche de l'optimisation d'un système énergétique par une approche paramétrique.

En parallèle (1998-2000), j'ai conduit un projet de recherche sur l'optimisation des effets d'inertie pour le chauffage et le rafraichissement de bâtiments. Ce projet Européen « JOULE III » OPTINER (Fuzzy OPtimiser of INERtial Effects) m'a permis de réaliser des algorithmes d'optimisation basés sur des méthodes de logique floue afin d'optimiser la relance du chauffage à effet joule ainsi que la maximisation de l'usage des stockages de glace pour le confort d'hiver et d'été. Ce fut par ailleurs une première expérience de coordination de projet Européen.

De 1999 à 2002, mes activités de recherche ont été réduites au profit du démarrage du Mastère Spécialisé en ingénierie et gestion de l'énergie et de l'organisation d'une nouvelle thématique de recherche. En 2001 je quittais le Centre d'Énergétique pour le Centre de Mathématiques Appliquées en vue d'y apporter mes compétences en énergétique afin d'y développer un axe spécifique à l'optimisation des systèmes énergétiques. J'ai en effet initié avec Nadia Maïzi (Directrice du CMA) une nouvelle thématique de recherche au Centre dans le domaine de la prospective énergétique long terme.

2002 en cours : AXE DE RECHERCHE : PROSPECTIVE ÉNERGÉTIQUE

Développement d'un axe de recherche sur la prospective énergétique au Centre de Mathématiques Appliquées de Mines ParisTech.

- *Nombreuses réunions avec des partenaires internationaux afin d'intégrer la communauté Markal/Times.*
- *À l'initiative du montage de plusieurs Thèses.*
- *Participation aux négociations pour permettre à la France d'être membre de l'ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program), consortium de l'AIE.*
- *Participation au montage de la Chaire MPDD (Modélisation Prospective au service du développement durable).*
- *Participation active aux activités de recherche de la Chaire.*

De 2002 à ce jour, mes activités de recherche se sont donc orientées vers la prospective énergétique.

Ce fut l'occasion de nouer des relations avec l'ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program) consortium dépendant de l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie) qui est chargé du développement des générateurs de modèles dédiés à la prospective énergétique long terme (famille de modèles MARKAL/TIMES). Il s'agit de modèles d'optimisations (Programmation Linéaire) qui permettent, à travers différents scénarios, de construire des futurs énergétiques possibles prenant en considérations diverses contraintes multidisciplinaires (contraintes tant techniques qu'économiques que politiques). Ces outils sont indispensables aux décideurs industriels et politiques. Le formalisme des générateurs de modèles que nous développons sont utilisés dans plus de 80 laboratoires de 40 pays. Ces relations que nous nouons avec ces entités ont pu aboutir à l'entrée de France dans l'ETSAP avec le CMA comme laboratoire référent.

Mes activités sont intimement liées au développement de modèles issus du générateur de modèles (MARKAL/TIMES). J'ai donc participé à différents projets Nationaux et Européens dans le domaine de la modélisation prospective des énergies renouvelables. D'une part, dans le projet Européen « Intelligent Energy Europe » RES2020 (Monitoring and Evaluation of the RES directives implementation in EU27 and policy recommendations for 2020) dans lequel nous étions chargés de la modélisation et de l'analyse des résultats pour la France dans le modèle européen 27 zones pour l'intégration des objectifs des trois fois vingt (20 % de réduction d'émissions de CO_2, 20% d'intégration d'énergies renouvelables et 20% d'efficacité énergétique supplémentaire). Ensuite nous avons réalisé avec Edi Assoumou (Chercheur au CMA) un modèle dédié à la valorisation de la biomasse pour la France dans le projet VALERBIO en collaboration avec l'INRA, l'IFP et le FCBA[1].

L'approche prospective des systèmes énergétiques demande, au-delà des connaissances techniques des systèmes énergétiques, une connaissance économique et politique du monde de l'énergie. En effet, afin d'être en mesure de modéliser l'évolution d'un système énergétique au sein d'un système global (qui peut être une région, un pays, voire le monde), il faut être en mesure de représenter toute la chaine énergétique de la production à l'usage de l'énergie avec ses contraintes et ses relations avec les autres systèmes productifs et de consommation.

De ce fait, je regarde aussi la modélisation d'autres secteurs autre que celui de la production d'énergie, en particulier le secteur industriel.
Ce fut l'occasion pour moi de monter une collaboration avec EDF par le biais de deux thèses sous convention Cifre. J'ai donc pu participer à l'encadrement de la thèse de M. Edi Assoumou, première thèse soutenue dans la thématique de la prospective énergétique au CMA. Ensuite j'ai dirigé (en tant que Maître de Thèse, car sans HDR je ne peux prétendre au titre de Directeur de Thèse) la thèse de M. Ahcène Djemaa et celle de M. Gondia Seck : ces deux thèses étant consacrées à l'amélioration de la représentation prospective du secteur de l'industrie.

Ces activités de prospective long terme nous ont permis le montage d'une Chaire Industrielle (la Chaire MPDD (modélisation prospective au service du développement durable) avec le support initial de 5 partenaires industriels (ADEME, EDF, RENAULT, SCHNEIDER-ELECTRIC, TOTAL)). Après avoir participé à son montage, j'y suis activement impliqué par l'élaboration de différents modèles. Cette chaire industrielle nous permet de renforcer nos compétences pour l'élaboration de nos modèles par la collaboration avec le CIRED (Centre International de Recherche en Économie du Développement) centre commun CNRS/EHESS/ École des Ponts ParisTech/ AgroParitech qui nous apporte un point de vue macro-économique qui manquait à nos modèles.
Le succès de la Chaire MPDD a permis son renouvellement en 2014 avec de nouveaux partenaires industriels (ADEME, EDF, SCHNEIDER-ELECTRIC et GRTGAZ).

[1] INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
IFP : Institut Français du Pétrole
FCBA : Institut technologique Forêt, Cellulose, Bois-construction, Ameublement

2010 en cours : AXE DE RECHERCHE : DÉVELOPPEMENTS ALGORITHMIQUES POUR L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Développement d'un axe de recherche sur l'élaboration d'algorithmes d'aide à la décision dans le domaine de la gestion de commodités (énergie/eau/déchets) au Centre de Mathématiques Appliquées de Mines ParisTech.

- *Rencontres avec des partenaires industriels et les start-up locales afin de recenser le besoin en vue de proposer des actions de recherche.*
- *Montage et réalisation de projets avec les Start-up et PME locales permettant la mise en œuvre d'algorithmes aide à la décision pour, d'une part, la meilleure gestion des déchets (E3DEnvironement), dautre part, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le résidentiel (GridTeams, WattGo) ainsi que dans le tertiaire et la petite industrie (SmartEnCo).*
- *Développement d'un Fablab au sein du CMA de Mines Paristech sur la mise en œuvre de capteurs et l'analyse de leurs données pour l'aide à la décision dans le bâtiment.*
- *Développement de collaborations avec l'Université de Berkeley en Californie sur la thématique des bâtiments communicants.*

Les nombreuses relations dans le monde industriel m'ont amené à développer des contacts qui me permettent d'initier différentes collaborations avec mes collègues sur les thèmes abordés au sein du CMA. Ces collaborations m'ont permis de renouer avec la thématique du contrôle des systèmes énergétiques que j'avais abordé lors de mon affectation au Centre d'Énergétique juste après ma thèse, avec le regard complémentaire de la prospective. De plus, le déploiement du paradigme de Smart Grids que nous explorons au sein du CMA m'a mené (au-delà de la coordination de projets proposés à nos élèves du Mastère Spécialisé OSE) à m'impliquer dans des projets en lien avec cette thématique. Je suis notamment impliqué dans le projet GridTeams (Projet soutenu par la région Paca et labélisé par le pôle de compétitivité Capenergies) afin d'apporter mon expertise dans la modélisation des besoins énergétiques des logements individuels dans le but de sensibiliser les occupants à la réduction de leur consommation. Ce projet a reçu le prix de la croissance verte numérique en 2011.
Le cœur de ma participation fut la mise au point d'algorithmes permettant une meilleure prise en considération des besoins énergétiques au niveau des bâtiments. Thématique que j'avais développée depuis le projet Optiner décrit précédemment.

En 2011, j'ai initié un projet lié à des aspects d'aide à la décision pour le développement durable. Il s'agit de motiver les personnes à mieux gérer leurs déchets pour aider les collectivités locales dans l'implémentation des nouvelles directives liées à la future redevance incitative. Nous travaillons avec une petite entreprise innovante (E3D Environnement) qui fait appel à nos compétences en matière d'aide à la décision que nous développons dans nos activités liées aux systèmes énergétiques (adaptation de méthodes de Clustering et Data Analytics, a des questionnaires terrains). Ce projet a abouti à la création d'une plateforme (GD6D) permettant la gestion des relations entre collectivités locales et particuliers sur la gestion des déchets.

En 2013, j'ai monté un autre projet dans la continuité de mes activités concernant le développement d'algorithmes pour l'aide à la décision, cette fois dans le secteur tertiaire. Je développe, à partir de méthodes issues de l'intelligence artificielle, des algorithmes permettant une meilleure gestion de l'énergie, de l'eau et les émissions de CO_2 dans les bâtiments tertiaires et les petites industries. Ce projet SmartEnCo, basé sur l'étude et l'analyse des mesures in-situ nous permet, toujours à partir de méthodes issues du Data Analytics, d'améliorer les futurs produits de pilotages des bâtiments.

Début 2016 avec Valérie Roy, nous avons entamé une collaboration avec la société WattGo par le biais de l'encadrement d'une Thèse sous convention Cifre sur les mêmes thématiques appliquées aux logements résidentiels.

Dans la continuité du développement de cet axe de recherche, j'ai proposé le déploiement d'un Fablab au sein du CMA sur le test et l'utilisation de capteurs sans fils pour la gestion énergétique efficace d'un bâtiment. Ce Fablab nous permet de pouvoir tester les développements algorithmiques liés au contrôle et à l'amélioration des performances des bâtiments, tant tertiaires que résidentiels. L'introduction des comportements, ainsi que l'usage des données terrains issus de capteurs de tous horizons, fait de cette thématique un axe de recherche du CMA en lien avec ses activités autour des smart-grids et de la ville durable. Ce projet est lié aux collaborations que nous avons entamées depuis 2014 avec l'Université de Berkeley en Californie. En effet, nous échangeons avec eux sur le pilotage des bâtiments à partir de l'étude de données capteurs in situ.

Depuis 2014, à l'initiative de Nadia Maïzi, un MoU (Memorandum of Understanding) entre le laboratoire BECI (Berkeley Energy and Climate Institute) de l'Université de Berkeley et le CMA a été signé. Dans ce cadre, je participe aux collaborations dans la thématique liée aux projets que j'ai développé au CMA (GridTeams et SmartEnCo) sur l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments à l'aide de technologies de mesure et de comptage.
Des premiers algorithmes de contrôle prédictif (à partir de techniques de Machine Learning) sont en cours de déploiement au sein d'un bâtiment de l'UC Berkeley.

Pour compléter ces collaborations internationales, outre les projets européens auxquels j'ai pu participer (Optiner, RES2020), j'organise un voyage d'étude à l'international chaque année depuis 15 ans pour mes élèves du Mastère Spécialisé OSE. C'est l'occasion au travers dix jours de visites techniques de rencontrer les acteurs industriels ainsi que des centres de recherche des pays visités (Chine, Inde, Norvège, Brésil, USA …) ce qui nous permet de tisser un réseau de connaissances internationales.

Pour conclure cette synthèse de mes activités de recherche entreprises depuis ma thèse, je peux dire que ces projets m'ont fait évoluer d'une approche de modélisation détaillée de systèmes énergétiques à leur intégration dans un système technico-économique plus global. Cette approche permet l'amélioration de modèles de prospective énergétique représentant la chaîne énergétique dans son ensemble, tant du le point de vue spatial que temporel. Elle permet aussi d'établir les liens connexes aux technologies pures qui font la pluridisciplinarité de la recherche en prospective. En parallèle de cette évolution, je continue mes recherches sur le développement de méthodes et algorithmes permettant l'aide à la décision dans le secteur du résidentiel tertiaire notamment. Ces recherches me permettront à terme de proposer une représentation plus fine des mécanismes permettant une amélioration de l'efficacité énergétique de ce secteur au sein des modèles de prospective long terme.

CHRONOLOGIE DES CONTRATS DE RECHERCHES

2015 : EN COURS WATTGO

Montage avec l'entreprise Wattgo (devenue Homepulse récemment), d'une thèse sous convention CIFRE pour le CMA sur la modélisation des dynamiques de consommation électrique des ménages en relation avec différentes variables exogènes.

2014 : GRTGAZ

Montage avec Edi Assoumou d'un projet de recherche pour le CMA sur l'évaluation prospective du déploiement des véhicules au gaz naturel en France.

2013 EN COURS : SMARTENCO

Montage et responsable du projet de recherche pour le CMA sur l'élaboration d'algorithmes innovants pour la gestion des bâtiments tertiaires. Projet financé par la région PACA et mené en partenariat avec IZYPEO, WIT, Acta-Consult. (Contrat Armines d'une durée de 24 mois prolongé suite à un retard dû à des intempéries sur les sites expérimentaux).

2011 2013: E3D ENVIRONNEMENT

Montage et responsable du projet de recherche pour le CMA sur l'élaboration d'algorithmes d'aide à la décision pour le management environnemental. Avec la société E3D-Environnement (Contrat Armines d'une durée de 18 mois).

2010 2013 : GRID-TEAMS

Montage et responsable du projet de recherche pour le CMA dans le cadre régional « AGIR pour l'énergie » GRID-TEAMS. Fidélisation à la maîtrise de la consommation énergétique par interaction sociale. Projet coordonnée par la société Gridpocket et en partenariat avec WIT, Planète OUI, Telecom ParisTech. (Durée 24 mois)

2008-2010 : VALERBIO

Responsable du projet VALERBIO (valorisation énergétique de la biomasse), projet de recherche mené en collaboration avec l'IFP, l'INRA et le FCBA, financé par la Fondation TUCK. Projet coordonnée par l'IFP. (Durée 24 mois)

2006-2009 : RES2020

Montage et responsable du projet Européen Inteligent Energy Europe (IEE-ALTENER), RES2020 « Monitoring and Evaluation of the RES directives implementation in EU25 and policy recommendations » (Project no: EIE/06/170/SI2.442662). Projet Coordonné par le CRES en Grèce. (Durée 30 mois)

1998-2001 : OPTINER

Montage, réalisation et participation à la coordination du projet Européen Joule III OPTINER « Fuzzy Optimiser of Inertial Effects » (Project no : JOE3-CT98-0094). (Durée 36 mois)

1997-1998 : ACCORD CADRE ARMINES/GDF – MODÉLISATION DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES

Réalisation de projets de recherche pour la direction des recherches de Gaz De France au sein d'un accord cadre « Armines/GDF » (Durée 12 mois)

FONCTIONS ADMINISTRATIVES

RESPONSABILITÉS DE FORMATIONS

- Responsable du montage du Mastère Spécialisé en Ingénierie et Gestion de l'énergie de l'École des Mines de Paris (1998-1999) (appelé Mastère OSE dans la suite du document)
- Responsable pédagogique et administratif du Mastère OSE (2000 – 2006)
- Responsable du Mastère OSE (2007 à ce jour)

AUTRES RESPONSABILITÉS

- Responsable de la mise en place du parc et de la gestion des PC du Centre d'Énergétique de l'École des mines de Paris (1993 – 1999).
- Responsable des sites Web du Mastère OSE et du CMA (2000 – 2010).
- Correspondant du SEMIR (Service informatique de l'INRIA) responsable du parc informatique du Centre de Mathématiques Appliquées lors de son hébergement au sein de l'INRIA Sophia Antipolis (2001 – 2006).
- Co-Responsable administratif du CMA (2006-2011).
- Membre du comité éditorial des Presses des Mines (2008 à ce jour).
- Responsable de la collection « Développement Durable » des Presses des Mines (2009 à ce jour).
- Responsable de l'organisation d'un Workshop et d'un Colloque :
    - Workshop « Le potentiel d'énergies renouvelables : évaluation et recommandations pour l'implémentation des directives Européennes pour la promotion des énergies renouvelables à l'horizon 2020 », 12 juin 2009, École des Mines de Paris, Paris.
    - Colloque « l'énergie par ses externalités » en collaboration avec l'Université de Corse, Capenergies et la Chaire MPDD, les 5,6 et 7 Mai 2010 à Ajaccio et Corte.
- Responsable de l'organisation et chairman d'une session dans la conférence EURO 2016 : « Energy efficiency in buildings ».
- Responsable de l'organisation et chairman d'une session dans la conférence EURO 2015 : « Energy efficiency and Industry ».
- Membre du Comité de pilotage de l'audit informatique du site de Sophia Antipolis de l'École des Mines de Paris (depuis 2011).
- Membre du club CA2D (Club des Acteurs du Développement Durable des Entreprises et Collectivités Responsables des Alpes-Maritimes) (depuis 2010).
- Membre de l'ATEE (Association Technique Energie Environnement) (depuis 2001)
- Membre de l'IAEE (International Association for Energy Economics) (de 2006 à 2010)
- Revues d'articles et communications pour :
    - Environmental planning and assessment, 2015
    - Journal of Environmental Planning and Management, 2013
    - Worldwide online conference CLIMATE 2011
    - Energy Engineering, Economics and Policy: EEEP 2011
    - Vertigo, la revue électronique en sciences de l'environnement, 2010
    - The IEEE-ICIT 2010
    - The IEEE Control Systems Society Conference Management System 2006
- Expertises pour l'ADEME, Agoranov (incubateur d'entreprises innovantes), GICC.

ENSEIGNEMENTS

L'enseignement dans la fonction de Maître Assistant (comme dans celle de Professeur) à Mines ParisTech n'est pas assujetti à un volume horaire annuel minimal de cours à dispenser.
La charge de cours peut donc être très variable en fonction des activités des personnels en termes de recherche et de fonctions administratives.
Les cours peuvent être dispensés :

- Dans le cycle ingénieur civil (à Paris)
- Dans les cours doctoraux (catalogue de cours mis à disposition des doctorants)
- Dans les Mastères Spécialisés de l'école.
- À l'extérieur (dans les universités, écoles d'ingénieurs, grands groupes industriels…)

Par ailleurs, MINES ParisTech encourage les enseignants-chercheurs qui le désirent à monter des formations spécialisées (Mastères et BADGES de la conférence des grandes écoles) qui s'appuient sur les thèmes de recherche développés par l'enseignant ainsi que sur les industriels partenaires de ces recherches dans lesquelles ils participent à l'enseignement.

ENSEIGNEMENT À MINES PARISTECH

- Depuis 2000, j'assure certains cours au sein du Mastère OSE : Analyse de la chaine énergétique (3h/an), énergie hydraulique (3h/an), La chaine charbonnière (jusqu'en 2009).
  Depuis 2009 un TP sur l'audit énergétique des bâtiments en faisant réaliser aux élèves un audit d'un bâtiment réel. (Volume annuel de 12h de cours et 40 h de TD).
  Enfin depuis 2014, j'assure le cours sur les moyens de production d'électricité (6h/an).

- Depuis 2002, j'assure les cours d'hydraulique au sein du tronc commun du Mastère Spécialisé en Energies Renouvelables de Mines Paristech. Ce mastère est un Mastère Européen organisé par l'EUREC (European Renewable Energy Research Centres Agency). (15 h de cours).

- En 2014 et 2015, j'étais en charge de la préparation et de l'encadrement du mini-projet d'un MIG (Métiers de l'Ingénieur Généraliste) qui est un module pour les élèves ingénieurs civils des Mines de première année dans lequel ils prennent la mesure des métiers de l'ingénieur à travers des cours, conférences et visites ainsi que d'un mini projet en groupe. Valérie Roy, responsable du MIG systèmes embarqués, m'a demandé de proposer le mini projet au sein de ce MIG. J'ai donc proposé un projet autour des VPP (Virtual Power Plant) en 2014 et autour de d'analyse de data pour les smart buildings en 2015. J'en assure une partie des cours ainsi que l'encadrement des élèves dans la réalisation de ces mini projets.

ENSEIGNEMENTS À L'EXTÉRIEUR

- De 1997 à 2000 : préparation et dispense des cours de conduction thermique du tronc commun du D.E.A. "Mécanique-Energétique" de l'Université de Nice Sophia-Antipolis (12 h de cours annuels)

- De 1997 à 2000 : formation des jeunes ingénieurs de la Direction de la Recherche de Gaz De France au Progiciel Allan.® /Neptunix® (solveur algébro-différentiel avec interface objet graphique du type Matlab®/Simulink®) permettant la modélisation des systèmes énergétiques. (30h de cours et TD une à deux fois par an)

- De 2000 à 2013 : mise en place et dispense d'un cours d'optimisation de la chaine énergétique en Master 2 à l'université d'Aix Marseille 2 (Institut de Mécanique 2).
  Initialement je dispensais ce cours au DESS CIG (Conception Industrielle Globalisée), puis au Master 2 MPI (Mécanique, Physique et Ingénierie) spécialité FLER (Fluides, Environnement et Risques). (30h de cours annuels puis 15h de cours à partir de 2009).

- Depuis 2008 j'interviens au sein de l'UDEL (Université d'été Lions en économie) au sein de laquelle j'assure deux conférences, l'une sur le développement durable et l'autre sur l'économie face aux transitions énergétiques. (8h annuels)

- De 2009-2012 j'ai également dispensé des séminaires de formation au pré-diagnostic énergétique des bâtiments tertiaires et commerciaux dans le cadre de la formation continue des professionnels du bâtiment par le biais de l'association ACEDEV (Association pour le conseil en écodéveloppement). (Séminaires de 24h plusieurs fois par an).

ENSEIGNEMENTS DE VULGARISATION

- J'ai également été sollicité pour donner des conférences et participer à des débats publics ou à des tables rondes au sein de différentes institutions (universités, associations, écoles d'été…)
  - Pour le grand public : sensibilisation à la problématique énergétique, débat sur le futur énergétique, débats publics pour la fête de la science…
  - Pour des lycéens et classes préparatoires aux grandes écoles : problématique énergétique en PACA, prospective énergétique, production d'électricité…
  - Pour les universités : l'hydraulique, analyse de la chaine énergétique…
  - Pour les professionnels : Tables rondes d'AGRION sur la prospective et les énergies renouvelables. Table ronde : Demain, les objets intelligents, pour la ville de Valbonne Sophia Antipolis...

LE MASTÈRE SPÉCIALISÉ® OSE (MONTAGE, ORGANISATION, SUIVI, DIRECTION)

Depuis 1998, j'ai eu l'opportunité avec mes deux collègues Nadia Maïzi et François-Pascal Neirac de créer un Mastère Spécialisé® dans la thématique de l'optimisation des systèmes énergétiques. Lors de sa création il avait été intitulé « ingénierie et gestion de l'énergie » et a été rebaptisé « optimisation des systèmes énergétiques » en 2008 du nom du groupe de recherche du Centre de Mathématiques Appliquées dont il fait partie.

Le Mastère Spécialisé® OSE est une formation de 12 mois, proposée aux ingénieurs ainsi qu'aux scientifiques disposant d'un diplôme Bac+5, désirant se spécialiser dans le monde de l'énergie à travers une approche originale basée sur l'optimisation.
Les débouchés à l'issue de cette formation sont nombreux et variés : ingénieur de recherche ou d'étude, chargé d'affaires, acheteur d'énergie, analyste de marchés ou risques…
L'enseignement qui se déroule à Sophia Antipolis et à Nice du 1er octobre de l'année N au 31 mars de l'année N+1, se présente sous forme de cours, conférences et projets autour de méthodes d'optimisation et d'aide à la décision. Les systèmes énergétiques sont abordés de façon globale, donnant aux étudiants les clés pour rechercher des solutions durables, répondant à des contraintes de plus en plus fortes : changement climatique, épuisement des ressources, contraintes politiques et financières, etc.
Les élèves effectuent ensuite une mission professionnelle de six mois, sanctionnée par la soutenance d'une thèse professionnelle.

Les partenaires académiques du Mastère :

Le CMA, qui organise le mastère spécialisé, s'est associé au Centre de Recherche en Économie et Droit de l'Énergie de la Faculté de Sciences Économiques de l'Université de Montpellier I (CREDEN) pour la partie économique et à l'École De Hautes Études Commerciales du Nord (EDHEC) pour la partie management de projet. La combinaison de ces trois cultures complémentaires permet d'aboutir à une compréhension complète des différents paradigmes du monde de l'énergie.
La pédagogie de cette formation pluridisciplinaire, mêlant aspects techniques, économiques, juridiques, environnementaux et de management, est basée sur de nombreux projets qui se déclinent autour d'un thème fédérateur. Nos élèves rédigent, autour de ce thème, une synthèse qui peut donner lieu à publication aux presses des Mines. Ils organisent également une conférence qu'ils dispensent auprès d'un public d'universitaires ou d'institutionnels lors du voyage d'Études de la promotion qui s'effectue en mars. Ce voyage est l'occasion d'appréhender la problématique énergétique dans un contexte international. Ils créent également un « événement » de type colloque, workshop, salon… Cet événement réunit des personnalités référentes dans la thématique fédératrice pour une journée d'échanges scientifiques. Enfin, les élèves conçoivent chaque mois une revue de presse, l'Inf'OSE, dans le domaine de l'énergie qui est envoyée aux enseignants et partenaires du Mastère.

Ce montage fut l'occasion de définir un programme pédagogique complet intégrant des composantes pluridisciplinaires. J'ai dû réunir les compétences de différents univers : Une école d'ingénieurs (Mines ParisTech), une école de management (l'EDHEC), une université en science économiques (Université de Montpellier) et de nombreux partenaires et intervenants du monde industriel.

De plus, les Mastères Spécialisés de l'École des Mines de Paris devant être auto financés, j'ai dû réunir un comité de pilotage industriel nous permettant de confronter notre projet à la réalité de la demande industrielle. En effet, chacun des élèves intégrant notre Mastère Spécialisé est parrainé par des partenaires industriels qui assurent le financement du Mastère et la rémunération des élèves qu'ils accueillent dans leur partie stage. Ce fonctionnement nous assure une parfaite adéquation de

la formation à la demande industrielle tout en assurant une formation de spécialisation pour des bac +5 (ingénieurs, managers et universitaires). L'implication financière du partenaire assure aussi la pertinence du sujet proposé à l'étudiant.

Ce fonctionnement me demande un très fort investissement dans la recherche des partenaires industriels qu'il faut convaincre que nos élèves, à l'issue de la partie de cours, seront bien dotés des compétences transverses qu'ils recherchent. Ce challenge me permet d'adapter le contenu pédagogique de la formation en fonction de l'évolution du monde de l'énergie.

Cette formation me permet aussi d'assurer un certain nombre de cours (voir section précédente) et de proposer des projets de promotion chaque année dont j'assure l'encadrement et la valorisation. J'assure aussi l'encadrement et le co-encadrement pédagogique de 3 à 8 élèves par an, selon les années et les sujets.

ENCADREMENTS DE THÈSES ET DE THÈSES PROFESSIONNELLES

DOCTORATS (3)

1. Elise PUPIER, en cours, *« Modélisation des dynamiques de consommation électrique des ménages en relation avec différentes variables exogènes* »
2. Gondia Sokhna SECK, 2012, « *Modélisation prospective de l'industrie diffuse pour l'évaluation de l'impact de politiques de maîtrise de l'énergie (MDE) à partir du générateur de modèle TIMES. La récupération de chaleur par pompes à chaleur dans l'industrie agroalimentaire* », Thèse de doctorat de l'École des Mines de Paris, soutenue le 4 janvier 2012.
3. Ahcène DJEMAA, 2009, « *Modélisation Bottom-Up, un outil d'aide à la décision long terme pour les mesures politiques en matière d'énergie et d'environnement - Le modèle TIMES appliqué aux industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE)* **»,** Thèse de doctorat de l'École des Mines de Paris, Soutenue le 7 mai 2009.

PARTICIPATIONS À DES JURYS DE THÈSE (2)

1. Gondia Sokhna SECK, 2012, « *Modélisation prospective de l'industrie diffuse pour l'évaluation de l'impact de politiques de maîtrise de l'énergie (MDE) à partir du générateur de modèle TIMES. La récupération de chaleur par pompes à chaleur dans l'industrie agroalimentaire* », Thèse de doctorat de l'École des Mines de Paris, soutenue le 4 janvier 2012.
2. Ahcène DJEMAA, 2009, « *Modélisation Bottom-Up, un outil d'aide à la décision long terme pour les mesures politiques en matière d'énergie et d'environnement - Le modèle TIMES appliqué aux industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE)* **»,** Thèse de doctorat de l'École des Mines de Paris, Soutenue le 7 mai 2009.

THÈSES PROFESSIONNELLES DE MASTÈRES SPÉCIALISÉS (71)

1. Frédéric VERDOL, 2001, *Étude du développement des différentes formes d'énergies nouvelles et renouvelables dans les îles de l'Arc Caraïbes*, EDF, Mastère OSE.
2. Boris PACHANY, 2001, *Élaboration d'un outil d'aide à la gestion de l'énergie (« outil de prédiction ») ayant pour vocation à être utilisé notamment dans un site sidérurgique intégré (« l'usine »)*, AIR LIQUIDE, Mastère OSE.
3. Philippe LAMY, 2001, *Optimisation des approvisionnements énergétiques d'un site industriel*, EDF, Mastère OSE.
4. Nicolas COLONNA, 2002, *Conception d'un optimiseur du couple coût confort pour un chauffage électrique par effet Joule d'un logement de type maison individuelle*, EDF, Mastère OSE.
5. Mathieu MALARA, 2002, *Les services d'audits énergétiques dans le tertiaire*, EDF, Mastère OSE.
6. Vincent LE SOMMER, 2002, *Étude de la mise en œuvre d'une démarche de management ISO 14001 pour la SNET (Société Nationale d'Électricité et de Thermique)*, SNET, Mastère Spécialisé en Ingénierie et Gestion de l'Environnement.
7. Florent CARRIERE, 2003, *Étude économique de la filière bois énergie en Corse et plan de développement de la filière*, COFATHEC, Mastère OSE.
8. Benoît JEANNE, 2003, *Simulation du comportement d'un opérateur fournisseur d'électricité devant arbitrer sa fourniture entre un parc de production distribuée implanté sur une zone étendue et un marché d'approvisionnement*, GDF, Mastère OSE.

9. Jérôme DUROYON, 2004, *Benchmark sur les modes de gestion et sur la valorisation des actifs gaziers : La prise en compte du risque physique dans les opérations d'arbitrage*, GDF, Mastère OSE.
10. Samuel MARCHAL, 2004, *Simulation du comportement d'un opérateur fournisseur d'électricité arbitrant sa fourniture entre un parc de production distribuée et un marché d'approvisionnement*, GDF/ADEME, Mastère OSE.
11. Anne MICLO, 2005, *Analyse de la demande énergétique mondiale de long-terme*, AREVA, Mastère OSE.
12. Audrey NECTOUX, 2005, *Politiques énergétiques locales du Royaume-Uni et de la Suisse*, EDF, Mastère OSE.
    Co-encadrement avec Edi Assoumou, chargé de recherche Armines.
13. Sébastien ROSE, 2005, *Évaluation économique mondiale des coûts de la chaîne gazière*, AREVA, Mastère OSE.
14. Juliette DEMAY, 2006, *Eolien offshore : Etude d'intégration paysagère*, TOTAL, Mastère OSE.
15. Lionel GIRARD, 2006, *Méthode Netback de définition du prix du Gaz Naturel sur l'aval gazier*, EDF, Mastère OSE.
16. Anne-Claire IMPENS, 2006, *Stratégies de maîtrise de la demande d'énergie à l'horizon 2050 : les enseignements des approches allemande et suisse*, EDF, Mastère OSE.
    Co-encadrement avec Nadia Maïzi, professeur Mines ParisTech
17. Lucie PETILLON, 2006, *Identification des voies de progrès dans la gestion des réseaux de chauffage urbain*, DALKIA, Mastère OSE.
    Co-encadrement avec Marc Bordier, chargé de recherche Mines ParisTech
18. Felipe PICHARD, 2006, *Modèle Markal pour le Chili. Analyse du développement du parc de production électrique pour les 50 prochaines années*, RENEWABLE POWER INTERNATIONAL, Mastère OSE.
    Co-encadrement avec François-Pascal Neirac, professeur Mines ParisTech
19. Cécile SEGUINEAUD, 2006, *Capture et stockage du CO_2*, AREVA, Mastère OSE.
20. Jean-Michel CAYLA, 2007, *Étude et aide à la réalisation de scénarios énergétiques prospectifs*, EDF, Mastère OSE.
    Co-encadrement avec Nadia Maïzi, professeur Mines ParisTech
21. Sébastien DELMAS, 2007, *Stratégie de développement de l'écomobilité scolaire à l'ADEME*, ADEME, Mastère OSE.
    Co-encadrement avec François-Pascal Neirac, professeur Mines ParisTech
22. Alexis DEMASSIET, 2007, *Prospective à long terme sur l'évolution des besoins de la filière nucléaire*, AREVA, Mastère OSE.
    Co-encadrement avec François-Pascal Neirac, professeur Mines ParisTech
23. Thibault DERBANNE 2007, *Combustibles alternatifs pour la production de sables bitumineux par voie thermique au Canada*, TOTAL, Mastère OSE.
    Co-encadrement avec François-Pascal Neirac, professeur Mines ParisTech
24. Pierre EVEILLARD, 2007, *Optimisation énergétique de la station d'épuration Seine Amont*, SEQUARIS-SUEZ, Mastère OSE.
    Co-encadrement avec Marc Bordier, chargé de recherche Mines ParisTech
25. Caroline GELEZ, 2007, *Valorisation énergétique de la biomasse et enjeux d'une mise en réseau*, EDF, Mastère OSE.
    Co-encadrement avec Marc Bordier, chargé de recherche Mines ParisTech
26. Sébastien GROS, 2007, *Bilans énergétiques fossiles des biocarburants*, BAYER CropScience, Mastère OSE.
    Co-encadrement avec Edi Assoumou, chargé de recherche Armines.
27. Nicolas LAFORTUNE, 2007, *Environnements et outils nécessaires pour améliorer le travail collaboratif dans le cadre de la géomodélisation*, TOTAL, Mastère OSE.
    Co-encadrement avec Lionel Menard, ingénieur de recherche Mines ParisTech

28. Pauline CAUMON, 2008, *Rôle du secteur électrique dans la lutte contre le changement climatique*, EDF, Mastère OSE.
    Co-encadrement avec Nadia Maïzi, professeur Mines ParisTech
29. Lydia COUDERT-CASSIER, 2008, *Politique européenne de l'énergie et du climat – quels enjeux pour le nucléaire ?*, AREVA, Mastère OSE.
30. Julien DELAITRE 2008, *Véhicules électriques et hybrides rechargeables : de l'électricité à l'expérimentation*, EDF, Mastère OSE.
31. Alexandre LEVY, 2008, *Prise en compte de la maîtrise de l'énergie et des énergies renouvelables dans la normalisation nationale et internationale*, ADEME, Mastère OSE.
32. Mathieu ROUZEYRE, 2008, *Quels outils d'amélioration de l'efficacité énergétique dans les activités d'exploration/production pétrolière ?*, TOTAL, Mastère OSE.
33. Claire WEBER, 2008, *Production d'hydrogène et capture du carbone*, AIR LIQUIDE, Mastère OSE.
34. Audrey BURNENS, 2009, Analyse *des technologies de Capture et Séquestration du CO_2 – Etude de la minéralisation et optimisation d'un procédé de purification de fumées d'oxycombustion*, AIR LIQUIDE, Mastère OSE.
35. Guillaume COURTOIS, 2009, *Facteurs d'évolution à 15 ans de la consommation d'électricité dans le secteur résidentiel*, RTE, Mastère OSE.
36. Cristina DE LA FUENTE, 2009, *Modèle multirégional sur le contenu énergétique des usages à partir des tableaux d'entrées-sorties*, EDF, Mastère OSE.
37. Anne-Laure GREGOIRE, 2009, *Performances environnementales des filières électrogènes. Positionnement concurrentiel d'AREVA*, AREVA, Mastère OSE.
    Co-encadrement avec Nadia Maïzi, professeur Mines ParisTech
38. Perrine GAUTHIER, 2010, *Développement de solutions de maîtrise des consommations énergétiques*, WIT, Mastère OSE.
39. Nicolas MEUNIER, 2010, *Participation à la mise en œuvre de la politique de développement durable de la SOREA*, SOREA, Mastère OSE.
40. Pierre MILLOT, 2010, *Optimisation et développement du portefeuille de capacités*, GDFSUEZ, Mastère OSE.
    Co-encadrement avec Nadia Maïzi, professeur Mines ParisTech
41. Prisca RANDIMBIVOLOLONA 2010, *Prédiction du rayonnement solaire global horizontal à l'horizon H+24*, EDF/Université de Corse, Mastère OSE.
42. Héléna WAGRET, 2010, *L'instabilité du réseau électrique insulaire accentuée par l'intégration à grande échelle du photovoltaïque. Le cas de l'île de la Réunion*, EDF, Mastère OSE.
43. Emmanuel WATRINET, 2010, *Réduction des consommations électriques dans le bâtiment : potentiel d'une solution passive*, BOUYGUES CONSTRUCTION, Mastère OSE.
44. Teddy BOUVET, 2011, *Algorithmes et expérimentations sur la gestion du couplage entre énergie intermittente (solaire) et stockage (batterie) raccordé au réseau électrique*, EDF/Université de Corse, Mastère OSE.
45. Renaud PACULL, 2011, *Dispersion des polluants lourds en milieu froid*, TOTAL, Mastère OSE.
46. Mariya FILATOVA, 2011, *Nanotechnologies dans le domaine de production de pétrole et de gaz*, TOTAL, Mastère OSE.
47. Bartosz BOGDAN, 2011, *Villes et aménagements du territoire, convergences énergie-environnement*, EDF, Mastère OSE.
48. Moutaz ALOTHMAN, 2012, *Station d'épuration de Valenton : optimisation énergétique du site, SEQUARIS (GDFSUEZ), Mastère OSE*
49. Manon FOUQUET, 2012, *Optimisation de centrales modélisées sous Dymola/Modelica, EDF, Mastère OSE.*
    Co encadrement Valérie ROY, maître de recherche Mines ParisTech
50. Thibaud GRIMALDI, 2012, *Méthodes d'évaluation du confort et de la qualité d'un environnement intérieur clos, WIT, Mastère OSE.*

51. David JESUWAME, 2012, *Optimisation des coûts énergétiques : Pilotage des fours de fusion, CONSTELLIUM, Mastère OSE.*
52. Thibault PERRIGAULT, 2012, *Identification et évaluation technico-économique des applications Smart Grid les plus pertinentes à court et long termes pour ADP, Aéroports de Paris, Mastère OSE.*
    Co encadrement avec Edi ASSOUOU, chargé de recherche Mines ParisTech
53. Julien ROMEZIN, 2012, *Gestion Optionnelle de réservoirs : analyses, méthodologies et applicabilités, CNR, Mastère OSE.*
    Co encadrement avec Marc Bordier, chargé de recherche Mines Paristech
54. Loïc GRUSON, 2013, *Efficacité énergétique segment industrie : Outil de calcul du coût global des équipements énergivores, Vinci Energie, Mastère OSE.*
55. Anne KURASIAK, 2013, *Etude technico-économique : Dimensionnement et choix du nombre de transformateurs, EDF Energies Nouvelles, Mastère OSE*
56. Clothilde PACUAL-JAOUANI, 2013, *Étude de potentiel d'un parc éolien au Maroc, EDF Energies Nouvelles, Mastère OSE*
57. Ronan PINAULT, 2013, *Étude, optimisation, consolidation et développement du mix énergétique, SOREA, Mastère OSE*
58. Xavier DRAN, 2014, *Projet Smartenco : Algorithmes pour Smart Buildings, CMA/IZYPEO, Mastère OSE*
59. Julien DUPRE, 2014, *Un projet d'efficacité énergétique dans l'industrie, AXIMA réfrigération, Mastère OSE*
60. Antoine GIRARD, 2014, *Le déploiement des techniques et méthodes d'optimisation pour l'efficacité énergétique dans l'industrie, ARMINES pour l'ADEME, Mastère OSE*
61. Jean MEYER, 2014, *La mobilité au Gaz Naturel Comprimé, GRTGAZ, Mastère OSE*
62. Jean-Baptiste PETRY, 2014, *Mise en place de la norme ISO 50001, l'efficacité énergétique au service de la compétitivité, Papèterie Du Léman, Mastère OSE*
63. Nicolas FELIX, 2015, Mobilité et éclairage public, EDF DCT, Mastère OSE
64. Odile FONKAM, 2015, *SmartEnCo : Élaboration d'algorithmes innovants pour le tertiaire, CMA/IZYPEO, Mastère OSE*
65. Rémi LAFOND, 2015, *Modélisation aéraulique dans les bâtiments tertiaires, BOUYGUES Construction, Mastère OSE*
66. Jérémy LIOGIER, 2015, *Développement de projets d'efficacité énergétique*, SOREA, Mastère OSE
67. Bastien THERY, 2015, *Optimisation de procédés industriels*, SOLVAY, Mastère OSE
68. Ghassene JEBALI, 2016, *Bâtiment intelligent : Contrôle optimal de la CVC via des techniques de machine learning et modélisation d'un bâtiment par réseaux de neurones artificiels*. UC. BERKELEY / CMA, Mastère OSE
69. Romain LE BOURSICOT, 2016, *Réseaux de chaleur et géothermie*, COFELY Réseaux, Mastère OSE
70. Valentin NOILHETAS, 2016, *Mobilité hydrogène : Développement d'une station de ravitaillement en hydrogène innovante*, AIR LIQUIDE, Mastère OSE.
71. Thomas RAMET, 2016, *Exploration de différentes voies d'amélioration d'efficacité énergétique en industrie*, ADEME, Mastère OSE

STAGES DE MASTER (6)

1. *Mahmoud SAIDI, 2016, « Bâtiments intelligents : Récolte de données issues d'un réseau de capteurs sans fil dans le bâtiment tertiaire et analyse des protocoles étudiés »* Mémoire d'ingénieur de l'école polytechnique de Tunis, Juin 2016, 76 p.
2. *Ghassene JEBALI, 2015, « Bâtiments intelligents, déploiement de capteurs sans fils et identification pour l'amélioration de l'efficacité énergétique »,* Mémoire d'ingénieur de l'école polytechnique de Tunis, Juin 2015, 62p.

3. Grégory OLIVA, 2011 *« Réalisation de simulation de consommation énergétique et recherche de clients. »* Mémoire de l'ENSGTI et du Master en administration des entreprises, Septembre 2011.
4. Julia CHANTEUR, 2001 « *Outil d'aide à l'initialisation des tableaux flous dans le chauffage des bâtiments à occupation intermittente* » Mémoire de D.E.A. de thermique et systèmes énergétiques de l'Université de Créteil, Juin 2001, 44 p.
5. Cédric CAMEZ, 2000 « *Optimiseur d'intermittence par logique floue adapté au chauffage électrique dans les bâtiments à occupation intermittente* », Mémoire de D.E.A. et diplôme d'ingénieur de l'I.U.S.T.I., Juin 2000, 57 p.
6. Saïd GUERROUMI, 2000, « *Étude d'un système de stockage de glace, et contribution à la modélisation du système »*, D.E.A. Énergétique, Université de Nice, Juin 2000.

AUTRES STAGES (2)

1. Julien DESFONTAINE, Thomas CARTAU, Jean-Christophe BIGEAULT, « *Mise en œuvre d'un module d'aide en ligne dédié au site internet du Mastère OSE sous l'environnement Breeze »*, IUT GTR, Université de Nice Sophia Antipolis, 2005.
2. Michel SEMINARA, « D*éploiements d'infrastructures informatiques au sein d'un centre de recherche »*, stage AFPA technicien de maintenance informatique, 2006.

PUBLICATIONS, CONGRÈS, RAPPORTS

OUVRAGES DE LIBRAIRIE

1. **Gilles GUERASSIMOFF**, « *Microgrids, pourquoi ? pour qui ?* », Presses des mines, à paraitre premier semestre 2017.
2. **Gilles GUERASSIMOFF**, Nadia MAÏZI, *« Smart Grids : Au-delà du concept, comment rendre les réseaux plus intelligents* », Presses des mines, novembre 2012, 388 pages – ISBN 9782911256936
3. **GUERASSIMOFF G**., MAÏZI N., « *Eau et énergie : destins croisés* », presses des mines, décembre 2010, 322 pages - ISBN 9782911256417
4. **Gilles GUERASSIMOFF**, Nadia MAÏZI, *« Iles et Énergies : Un paysage de contrastes »*, Presses des Mines, Septembre 2008, 326 pages – ISBN 9782356710116

ARTICLES DANS DES REVUES À COMITÉ DE LECTURE

1. Gondia Sokhna SECK, **Gilles GUERASSIMOFF**, Nadia MAÏZI, « *Analysis of the importance of structural change in non-energy intensive industry for prospective modeling: The French case* », Energy Policy 89, (2016) Pages 114-124.
2. **Gilles GUERASSIMOFF**, Johann THOMAS, « *Enhancing energy efficiency and technical and marketing tools to change people's habits in the long term* », Energy and Buildings 104 (2015), Pages 14-24.
3. Gondia Sokhna SECK, **Gilles GUERASSIMOFF**, Nadia MAÏZI, « Heat recovery using heat pumps in non-energy intensive industry: are energy certificates a solution for the food and drink industry in France? », Applied Energy 156 (2015) Pages 374-389.
4. Nicklas FORSELL, **Gilles GUERASSIMOFF**, Dimitris ATHANASSIADIS, Alain THIVOLLE-CASAT, Daphné LORNE, Guy MILLET, Edi ASSOUMOU, « *Sub-national TIMES model for analyzing future regional use of Biomass and Biofuels in Sweden and France »,* Renewable Energy 60 (2013) Pages 415-426.
5. Gondia Sokhna SECK, **Gilles GUERASSIMOFF**, Nadia MAÏZI, « *Heat recovery with heat pumps in non-energy intensive industry: A detailed bottom-up model analysis in the French food & drink industry* », Applied Energy 111 (2013) Pages 489-504.
6. A. HITA, G. SECK, A. DJEMAA, **G. GUERASSIMOFF**, « *Assessment of the potential of heat recovery in food and drink industry by the use of TIMES model »*, Eceee 2011 Summer Studyproceedings (ISBN: 978-91-633-4455-8), revue ECEEE: European Council for an Energy Efficient Energy. Pages 735-745
7. Alain HITA, Ahcène DJEMAA, **Gilles GUERASSIMOFF**, Nadia MAÏZI *« Modeling the response of industry to environmental constraint »,* Eceee 2009 Summer Studyproceedings (ISBN 978-91-633-4454-1) revue ECEEE: European Council for an Energy Efficient Energy. pages : 1 163 - 1 170
8. DJEMAA, A. HITA, **G. GUERASSIMOFF**, N. MAÏZI, *« Modelling Energy Saving Potential in Industry »*, Eceee 2007 Summer Studyproceedings (ISBN: 978-91-633-0899-4),revue ECEEE The European Council for an Energy Efficient Economy, pages 1383 – 1393.
9. ASSOUMOU E, BORDIER M, **GUERASSIMOFF G**, GRANGE C, MAÏZI N., « *La famille MARKAL de modèles de planification énergétique : un complément aux exercices de modélisation dans le contexte français* ». Revue de l'Énergie 2004; Juillet/Aout 2004, 357-367.

ARTICLES DANS DES COLLOQUES AVEC COMITÉS DE LECTURE.

1. **G. GUERASSIMOFF**, J. THOMAS, « *Enhance energy efficiency, technical and marketing tools to switch people habits in the long term* », Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting (EEDAL), Coimbra, Portugal, 11-13 September 2013.

2. G.SECK, **G. GUERASSIMOFF**, « *Industrial heat recovery and heat pumps systems* », 3rd international Symposium on Energy Engineering, Economics and Policy, EEEP, Orlando 19-22 July 2011
3. ASSOUMOU Edi, **GUERASSIMOFF Gilles**, SELOSSE Sandrine and MAIZI Nadia, *« ETSAP modeling tools: a bottom-up framework for energy issues »*, 24th European Conference on Operational Research (EURO), Lisbon, Portugal, July 11-14, 2010
4. FORSELL N., **GUERASSIMOFF G.**, ATHANASSIADIS D., ASSOUMOU E. « *Sub-national TIMES model for analyzing regional future use of Biomass and Biofuels in France and Sweden* » International Energy Workshop (IEW), Suede (2010)
5. **GUERASSIMOFF Gilles** and ASSOUMOU Edi, *« Modelling biomass for energy uses: results for France"*, 33rd IAEE International Conference », The Future of Energy: Global Challenges, Diverse Solutions", Rio de Janeiro, Brazil, June 6-9, 2010
6. MAZAURIC Vincent, MAÏZI Nadia, ANGLADE Alain et **GUERASSIMOFF Gilles**, *« Desperately seeking energy efficiency...using Information and Communication Technologies? »,* IEEE Power System Conference and Exhibition, PSCE 2009 "The next generation grid", Seattle, Washington, USA, March 15-18, 2009
7. **GUERASSIMOFF Gilles**, ASSOUMOU Edi, MAÏZI Nadia et BORDIER Marc, *« Biomass for energy uses: assessment methodology for France »*, 10th IAEE European Conference "Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies", Vienna, Austria, September 7-10, 2009
8. ASSOUMOU Edi, MAIZI Nadia, BORDIER Marc, **GUERASSIMOFF Gilles**, *« Assessing Carbon Values to achieve strong post Kyoto CO_2 reduction targets for France »*, IAEE Istanbul, July 2008
9. Felipe PICHARD, Edi ASSOUMOU, **Gilles GUERASSIMOFF**, Nadia MAÏZI, Marc BORDIER *« Prospective Analysis of the Chilean Power Generation Park with MARKAL »* International Energy Workshop, Stanford 25 juin 2007.
10. Vincent MAZAURIC, Nadia MAÏZI, Alain ANGLADE and **Gilles GUERASSIMOFF**, *« Desperately Seeking for Energy Efficiency… Using Information and Communication Technologies? »*, présentation à l'International Energy Workshop, Stanford 25 juin 2007.
11. DELENNE B., BOULARAN J., MODE L., EL GOLLI R., BEZIAN J.J., **GUERASSIMOFF G.** « *Stability study of a pressure regulator by modelling and experimental design (Etude de stabilité d'un détendeur régulateur modélisation et plans d'expériences)* », International Gas Research Conference, Amsterdam Hollande, 5-8 Novembre 2001.
12. **G. GUERASSIMOFF**, L. FULCHERI & al., « *Régulateur flou pour la gestion optimisée des systèmes de climatisation par stockage de glace* », Séminaire RCT2000, Régulation Commande Télégestion, Sophia-Antipolis 8-9 Mars 2000.
13. **G. GUERASSIMOFF**, L. FULCHERI & al., « *Optimiseur d'intermittence par logique floue adapté aux systèmes de chauffage électrique dans les bâtiments collectifs* », Séminaire RCT2000, Régulation Commande Télégestion, Sophia-Antipolis 8-9 Mars 2000.
14. BEZIAN J.J., **GUERASSIMOFF G**., FONZES G., GSCHWIND M., LOISEAU P., *» Thermique des bâtiments : couplage chauffage aéraulique plancher chauffant »,* 8èmes Journées Internationales de Thermique, Marseille, Juillet 1999, Actes du Congrès, Vol. 2, pp. 377-384
15. B. DELENNE, S. NEROT-SALHI, **G.GUERASSIMOFF**, *« Modélisation - Simulation d'une chaudière modulante : comparaison de différentes stratégies de chauffage »*, International Building Performance Simulation Association, Sophia-Antipolis 10-11 Décembre 1998, 9p.
16. **GUERASSIMOFF G**., BEZIAN J.J., *« Étude numérique du refroidissement évaporatif d'un nuage compact de gouttelettes d'eau »,* Congrès SFT 97, Toulouse, Mai 1997 Actes du congrès : "Thermique aéronautique et spatiale", Elsevier pp. 631-636.

17. **GUERASSIMOFF G**., BEZIAN J.J., **«** *Non-Stationnary Study of a Non-Isothermal Turbulent Air Jet »,* Fluent 1996 European Users' Group Meeting, Heathrow, U.K., 1996 , Inc proceeding, P7.
18. **GUERASSIMOFF G**., BEZIAN J.J., FONZES G., *« Caractérisation des Paramètres Descriptifs d'un Jet Anisotherme »,* Congrès SFT 96, Valenciennes, Mai 1996. Actes du congrès : "thermique et transports", Elsevier pp.569-574.

COMMUNICATIONS DANS DES COLLOQUES AVEC COMITÉS DE LECTURE.

1. **G. GUERASSIMOFF**, G. SECK, A. DJEMAA, A. HITA, N. MAÏZI, « *Modeling the industry sector for decision making for mid to long-term energy efficiency planning* », Energy Technology System Analysis Program workshop, Cape Town, June 2012.
2. G.SECK, **G. GUERASSIMOFF**, N. MAÏZI, A. HITA, « *The heat recovery potential in French industry: A survey of opportunities for heat pumps systems in food and beverages sector* », Annual International Conference of the German Operations Research Society, Berlin September 2010
3. **G. GUERASSIMOFF,** E. ASSOUMOU, N. FORSELL, N. MAÏZI, *« Prospective Analysis Of Biomass Resources And Technology Roadmap For France: Results From The VALERBIO Project* », European Biomass Conference, Lyon 3-7 Mai 2010, (ISBN 978-88-89407-56-5).
4. **Gilles GUERASSIMOFF**, Edi ASSOUMOU, Nadia MAÏZI, Marc BORDIER, *« Biomass for energy uses: results for France »,* ERSAP-TERI Int. Workshop, New Delhi Jan. 2010.
5. Ahcène DJEMAA, Alain HITA, **Gilles GUERASSIMOFF**, Nadia MAÏZI, *« MODELING ENERGY SAVING POTENTIAL IN INDUSTRY, Case of the European Steel industry »*, Ecole d'automne Infratain, Infrastructure Regulation Modeling, and Policy, Berlin 1-6 Octobre 2007.
6. N. MAÏZI, E. ASSOUMOU, **G. GUERASSIMOFF**, M. BORDIER AND V. MAZAURIC, « *Key features of the electricity production sector through long-term planning: the French case* », Power Systems Conference and Expo, Atlanta, 2006.
7. NADIA MAÏZI, EDI ASSOUMOU, MARC BORDIER, **GILLES GUERASSIMOFF**, *« Energy mix planning for the French electricity production sector »,* European Conference on Operational Research Euro2006, Reykjavik 2-5 Juillet 2006.
8. EDI ASSOUMOU, MARC BORDIER, **GILLES GUERASSIMOFF**, NADIA MAÏZI, *« Reducing greenhouse gas emissions by a factor of 4 by 2050: a bottom-up analysis of post Kyoto emissions targets for France »,* International Energy Workshop, Cape-Town 27-29 Juin 2006.

AUTRES COMMUNICATIONS

1. **GUERASSIMOFF Gilles**, *« Improving energy efficiency in the residential and tertiary sector by data analysis* », EURO 2016 Conference, Poznan Poland, 3-6th of July 2016
2. **GUERASSIMOFF Gilles**, « *decision making tool for improving energy efficiency in the indusrty sector* », EURO 2015 Conference, Glasgow Scotland, 13-15th of July 2015
3. **GUERASSIMOFF Gilles**, « *L'optimisation appliquée à l'efficacité énergétique dans l'industrie Pourquoi quand et comment ?* » Colloque ADEME « Techniques et méthodes d'optimisation pour l'efficacité énergétique dans l'industrie », Rouen le 18 septembre 2014
4. MAÏZI Nadia, **GUERASSIMOFF Gilles**, ASSOUMOU Edi *« Déploiement des énergies renouvelables en Europe : place de la France, question des pays intensifs en carbone »,* « Décisions politiques et économiques face aux enjeux énergie-climat» Journée de l'Université TOTAL, 18 Février 2010.
5. **Gilles GUERASSIMOFF**, *« An experience in the energy systems modelling with National and European models»,* Joint Research Centre Expert Workshop « Meeting the European

energy challenges using non-fossil fuel technologies », Energy Institute Hrvoje Pozar, Zagreb Croatia, 18-19 Feb. 2010.

6. **Gilles GUERASSIMOFF**, *« la modélisation prospective au Centre de Mathématiques Appliquées »,* CERESUR, Université de la Réunion, 30 novembre 2009.
7. ASSOUMOU Edi et **GUERASSIMOFF Gilles**, « *Ressources agricoles, biocarburants et modélisation prospective TIMES »*, Journée de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable, Ecole des Ponts ParisTech, Marne-la-Vallée, 20 novembre 2009.
8. **G. GUERASSIMOFF**, RES2020, « *Le Potentiel d'énergies renouvelables : évaluation et recommandations pour l'implémentation des directives Européennes pour la promotion des énergies renouvelables à l'horizon 2020. La méthodologie TIMES* », National Workshop RES 2020, Paris, 12-06-2009.
9. **G. GUERASSIMOFF**, RES2020, « *Le Potentiel d'énergies renouvelables : évaluation et recommandations pour l'implémentation des directives Européennes pour la promotion des énergies renouvelables à l'horizon 2020. Le modèle TIMES Européen : scénario et résultats pour l'Europe des 27* », National Workshop RES 2020, Paris, 12-06-2009.
10. Edi ASSOUMOU, Nadia MAÏZI, **Gilles GUERASSIMOFF**, Marc BORDIER, « *Mitigation targets and carbon values: insights from TIMES-FR »,* "Carbon and Prospective" - Colloque international inaugural de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable - Mines ParisTech / ETSAP, Dec 2008, Sophia Antipolis, France
11. Nadia MAÏZI, Edi ASSOUMOU, Marc BORDIER, **Gilles GUERASSIMOFF,** *« Markal-Times assessment of long term CO_2 emissions targets for France »*, European Conference on Operational Research Euro XXII, Prague 8-11 July 2007.
12. EDI ASSOUMOU, MARC BORDIER, **GILLES GUERASSIMOFF**, NADIA MAÏZI, *« Exercices de prospective technologique pour l'énergie à l'horizon 2050 »,* Ecole Energies et Recherche, Fréjus 2006.
13. EDI ASSOUMOU, **GILLES GUERASSIMOFF**, NADIA MAÏZI, MARC BORDIER, *«Etudes de sensibilité pour la prospective électrique française à l'aide du Modèle MARKAL »,* 4ème colloque MONDER, Martigny (Suisse), 8-11 Janvier 2006.
14. NADIA MAÏZI, EDI ASSOUMOU, MARC BORDIER, **GILLES GUERASSIMOFF**, *« Prospective énergétique : Le modèle MARKAL », présentation à la Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières, DGEMP 16 Mai 2005.*
15. N. MAÏZI, M.BORDIER E. ASSOUMOU **G. GUERASSIMOFF**, « *Enjeux environnementaux et planification énergétique européenne* », Rapport pour l'Institut Français de l'énergie / Conseil Français de l'énergie, Février 2004.
16. N. MAÏZI, M. BORDIER C. GRANGE **G. GUERASSIMOFF**, « *Markal: une application au secteur de la production électrique en France* », Rapport pour l'Institut Français de l'énergie / Conseil Français de l'énergie, Février 2004.
17. **G. GUERASSIMOFF**, *« Study of non isothermal submerged air jets for integration in ATHEBES to improve evaluation of thermal comfort »*, Seminary about Thermal Control, DELPHI, Luxembourg, 2nd of june 1998.

RAPPORTS CONTRACTUELS ET AUTRES RAPPORTS

1. Rapport final Projet GRTGAZ, 2014.
2. Gilles GUERASSIMOFF, **2 Rapports intermédiaires** du projet SmartEnCo, 2014
3. Gilles GUERASSIMOFF, Contribution au Rapport final du projet Grid-Teams, 2013
4. **G. GUERASSIMOFF**, Projet E3D Environnement, Rapport final de prescription pour l'élaboration d'un outil de recommandation de geste pour une prise de conscience environnemental, janvier 2013

5. Club CA2D, *« L'Efficacité énergétique du bâtiment tertiaire et collectif dans le 06* », Livre Blanc, 129 p., Mars 2011-10-03 Disponible en consultation : http://fr.calameo.com/read/000902131bd0d7bb1ba4d
6. A. PRIEUR, **G. GUERASSIMOFF**, N. NGUYEN-THE, F. JACQUET, Projet VALERBIO (Valorisation de la Biomasse), Rapport de synthèse, Valorisation énergétique de la biomasse à horizon 2050, IFP, INRA, FCBA, Mines ParisTech, 2010.
7. **G. GUERASSIMOFF**, E. ASSOUMOU, Projet VALERBIO (Valorisation de la Biomasse), Rapport Tâche 1d, 2b, 4, Rapport de modélisation, Mines ParisTech, 2010.
8. E. ASSOUMOU, **G. GUERASSIMOFF**, Projet VALERBIO (Valorisation de la Biomasse), Rapport Tâche 4, Simulation de scénarios et résultats, Mines ParisTech, 2010.
9. D. LORNE, F. BOUVART, **G. GUERASSIMOFF**, E. ASSOUMOU, Projet VALERBIO (Valorisation de la Biomasse), Rapport Tâche 2-A, Définition des hypothèses technico-économiques de la conversion de la biomasse, IFP, Mines ParisTech, 2010.
10. **G. GUERASSIMOFF**, E. ASSOUMOU, RES2020 Project, Monitoring and Evaluation of the RES directives implementation in EU27 and policy recommendations for 2020, Project no: EIE/06/170/SI2.442662, Country Report France, 2009.
11. L. FULCHERI**, G. GUERASSIMOFF**, OPTINER : FUZZY OPTIMISER OF INERTIAL EFFECTS, ARMINES Contract JOE3-CT98-0094,
    Rédaction de 6 rapports intermédiaires et du rapport final de 1998 à 2001.
12. BEZIAN Jean-Jacques, **Gilles GUERASSIMOFF**, *Modélisation d'un four de réchauffage*. Rapport final d'une action de l'Accord Cadre GDF-CENERG, Juin 2000
13. **GUERASSIMOFF Gilles** et BEZIAN Jean-Jacques *Modélisation d'un détendeur à action piloté* Rapport final d'une action de l'Accord cadre GDF – CENERG 1999
14. **GUERASSIMOFF Gilles** et BEZIAN Jean-Jacques *Modélisation d'un moteur GNV (Gaz Naturel pour Véhicule)* Rapport final d'une action de l'Accord cadre GDF – CENERG 1998
15. **GUERASSIMOFF Gilles** *Étude CTGN Simulation d'une chaudière externe modulante* Rapport final d'une action de l'Accord cadre GDF – CENERG 1998
16. **GUERASSIMOFF Gilles** *Positionnement commercial d'Allan vis-à-vis de ses concurrents : analyse des modélothèques disponibles* Rapport final d'une action de l'Accord cadre GDF – CENERG 1998
17. **GUERASSIMOFF Gilles** et BEZIAN Jean-Jacques, *Modélothèque de procédés industriels : cahier des charges.* Rapport final d'une action de l'Accord Cadre GDF – CENERG 1998
18. **GUERASSIMOFF Gilles,** *Étude théorique et expérimentale des jets anisothermes en vue de leur simulation numérique*, projet de recherche M110 avec l'IMRA (Institut Minoru de Recherches Avancées).
    Rédaction de 3 rapports intermédiaires : Mars 1995, Juin 1995, Juin1996, et du rapport final en Mars 1997.

MÉMOIRES DE TRAVAUX DIPLÔMANTS

1. ***G. GUERASSIMOFF**, « Étude des jets en vue de leur application dans un habitacle automobile »,* Mémoire de stage de D.E.A. d'Énergétique de l'Université de Nice, effectué au Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris. 1992, 52 pages
2. ***G. GUERASSIMOFF**, « Étude numérique de jets d'airs horizontaux et de la brumisation en vue de leur couplage pour le rafraichissement d'enceintes habitables »,* Doctorat de l'École des Mines de Paris– Spécialité Énergétique, 1997, 297 pages. *Thèse soutenue à Sophia-Antipolis le 7 novembre 1997.*

Partie 2
TRAVAUX SCIENTIFIQUES

INTRODUCTION

Les systèmes énergétiques : vaste domaine pluridisciplinaire dans lequel toute discipline trouve une place de choix. Au cours des vingt dernières années qui ont suivi mon doctorat, je n'ai eu de cesse de promouvoir l'amélioration de nos systèmes énergétiques de toutes sortes.
Ayant commencé par la modélisation de ces systèmes afin de mieux les contrôler, mon arrivée au CMA m'a permis de découvrir de façon plus formalisée l'optimisation de tels systèmes.
Ensuite, que ce soit au travers de toutes les thèses professionnelles des élèves du Mastère Spécialisé OSE ou des projets de recherche auxquels j'ai pu participer, l'amélioration, voire l'optimisation des systèmes a été au cœur de mes travaux. Ma participation à l'élaboration d'un axe de recherche dédié à la prospective énergétique m'a permis d'entrevoir une nouvelle application tout aussi importante que la modélisation et le contrôle des systèmes énergétiques : la mise au point d'outils d'aide à la décision pour élaborer des avenirs possibles pour les systèmes énergétiques. Ce fut l'occasion de mêler une partie économique au travail effectué jusqu'alors. Cette dimension, toute aussi importante que la partie purement technologique, permet une meilleure intégration des avancées faites dans ce domaine des systèmes énergétiques.

Dans cette partie, je présente l'évolution des travaux scientifiques que j'ai pu mener ou encadrer lors de ces dix dernières années.
J'articulerai cette partie selon deux axes que j'ai brièvement décris dans la partie précédente en commençant par la partie prospective des systèmes énergétiques.
Ensuite j'aborderai les travaux dédiés aux développements algorithmiques pour l'amélioration de l'efficacité énergétique avant de présenter quelques futurs axes de recherche en guise de perspectives.

LA PROSPECTIVE DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES

Après avoir défini ce qu'est la prospective et son utilité, je présenterai brièvement le générateur de modèle que nous utilisons et développons au sein du CMA. J'illustrerai alors mes travaux de recherche par deux cas concrets de systèmes énergétiques très différents :

- D'une part, les systèmes renouvelables qui mobilisent une grande partie de la communauté de chercheur. Ce point de vue de systèmes productifs (allégeant le poids de la contrainte carbone sur le système productif global) permet de mettre en exergue tout le potentiel d'une modélisation prospective technico-économique. En effet, l'étude des impacts sur le système d'une intégration de systèmes renouvelables permet aux décideurs de mesurer les différentes politiques de déploiements qu'ils doivent mener pour satisfaire aux contraintes qui peuvent être imposées par certaines directives européennes par exemple.
- D'autre part, je présenterai mes recherches sur un système très émissif et consommateur qu'est le système industriel. Il s'agit là de regarder la façon dont les systèmes énergétiques plus performants peuvent être mis en œuvre dans les différents secteurs de l'industrie afin de réduire l'impact global du système productif industriel.

LA PROSPECTIVE ÉNERGÉTIQUE LONG TERME

Dans toute recherche on tend à se projeter dans un futur plus ou moins proche afin d'envisager ce que les résultats obtenus produisent comme bénéfices pour la communauté scientifique. Ce qui peut laisser penser que tout chercheur entreprend, plus ou moins consciemment, une démarche prospective imaginant les différents scénarios qui pourraient conduire à valoriser sa recherche.
Cette démarche prospective a donné lieu, par ses pères fondateurs français (Berger et al., 2007), à une discipline à part entière alimentant souvent les débats autour de questions épineuses comme le changement climatique.

Pour être en mesure de proposer des outils d'aide à la décision dans de nombreux domaines pluridisciplinaires, la modélisation prospective semble bien adaptée. La construction de modèles, basées sur différents paradigmes (projection, simulation, optimisation...), permet d'explorer des futurs possibles sans pour autant donner une prévision de long terme. L'amalgame est d'ailleurs souvent présent dans l'interprétation des résultats de tels modèles. Il est donc impératif de rappeler, à chaque présentation de nouveaux résultats, qu'il s'agit d'une vision qui correspond aux scénarios et hypothèses considérés pour effectuer le calcul et non pas de l'avenir.

Dans le cadre de la prospective énergétique, une attention particulière doit être portée aux hypothèses retenues, tant dans le domaine des futures technologies disponibles que dans l'élaboration des scénarios de prix et de ressources en énergie et matières premières. L'AIE (Agence Internationale de l'Energie) met en œuvre différents modèles de prospective énergétique pour produire ses visions de long terme (World Energy Outlook (AIE, 2015), Energy Technology Perspectives (AIE, 2016)).
Chaque année ou tous les deux ans, ces ouvrages de référence montrent des futurs et tendances possibles de l'usage de l'énergie ou des technologies déployables au niveau mondial.

Il n'existe malheureusement pas un type de modèle universel qui pourrait répondre à toutes nos interrogations tant elles sont nombreuses et variées. L'offre est importante et chacun répond, de différentes façons, aux questions de l'avenir énergétique en fonction des disciplines desquelles ils découlent. Selon les réponses attendues, la représentation du système énergétique étudiée sera très différente et empreinte de diverses simplifications. Les classifications des modèles de prospective ayant déjà été largement abordés de différentes façons (économique versus technologique, simulation versus optimisation, hybridations en tout genre…) (Boulanger and Bréchet, 2005; Després et al., 2015; van Beeck, 1999), nous résumons ci-dessous les principales catégories nous permettant de situer l'approche que nous avons choisie.

Trois grandes familles de modèles émergent dans l'offre actuelle.
Nous avons d'abord une famille de modèles très intégrée ne s'appliquant qu'à une vision mondiale car intégrant les effets climatiques :

- **Les modèles IAM** (Integrated Assessment Model) souvent issus de la thématique environnementale. Ils permettent une vision globale intégrant les effets des systèmes énergétiques sur le climat (Peters and Hertel, 2016). La dimension pluridisciplinaire qu'impose l'intégration de ces bouclages climatiques implique certaines agrégations spatiales et technologiques ne permettant pas de regarder le détail technologique d'une région particulière. Des premiers modèles DICE & RICE (Nordhaus, 1992; Nordhaus and Yang, 1996) qui ne comportaient qu'un seul secteur économique, ont émergé de nombreux autres modèles : MERGE (Kypreos, 2007; Manne et al., 1995), MESSAGE-MACRO (Messner and Schrattenholzer, 2000), IMAGE (Rotmans, 1990), MiniCAM (Clarke et al., 2008)… Ils ont permis un raffinement de la représentation des différentes disciplines abordées et proposent des modèles hybrides multirégionaux et multisectoriels améliorant ainsi la visibilité des résultats (Kriegler et al., 2014).

Si l'on souhaite se concentrer sur une région ou un secteur particulier, nous devons faire appel à l'une des deux approches suivantes, dont le récapitulatif est présenté sur la Figure 1 ci- après.

- **Les modèles Top-Down** ont l'approche la plus « économiste » de l'exercice de prospective. Deux catégories se distinguent :
    - les modèles macro économétriques, NEMESIS (Arnaud Fougeyrollas et al., 2015), HERMES (EU Commission, 1993)],
    - les modèles d'équilibre général calculable, GREEN (Burniaux et al., 1992), GEMINI E3 (Bernard and Vielle, 1998), GEM-E3 (Capros et al., 2013), WIAGEM (Kemfert, 2001).

Partant d'une information globale de l'économie (tableaux entrées-sorties de la comptabilité nationale ou données historiques), ils désagrègent les secteurs aussi loin que possible afin d'améliorer la pertinence dans le raffinement des résultats proposés. Ces modèles intègrent les échanges de biens entre secteurs, mais ne peuvent proposer une désagrégation fine du secteur énergétique. Celui-ci n'est souvent représenté que sous forme de fonctions de production paramétrables. Par construction, ces modèles permettent de prendre en considérations les dimensions économique, sociale et environnementale.

- **Les modèles Bottom-Up** ont l'approche plus « ingénieur ». Ils se fondent sur une désagrégation la plus fine possible du système énergétique étudié. Ils permettent, moyennant l'établissement de scénarios sur les variables exogènes au modèle (évolution de la demande en énergie, du prix des combustibles et des matières premières, de la croissance économique…), de produire un chemin technologique permettant de répondre aux scénarios définis. Ce chemin pourra être obtenu soit par simulation (modèle POLES, (Kitous et al., 2010)) soit par optimisation (modèle MARKAL/TIMES (Fishbone and Abilock, 1981; Richard Loulou et al., 2016) ou MESSAGE (Messner and Strubegger, 1995)). Il donnera ainsi accès à des données marginales issues du calcul d'optimisation, fort utile pour un outil d'aide à la décision.

  Certains combinent les deux approches comme le modèle PRIMES pour l'Europe (E3MLab, 2014). Ces modèles peuvent se décliner sectoriellement et spatialement sur divers horizons de temps jusqu'au long terme. Ils quantifient les technologies mises en œuvre pour la réalisation d'un objectif sur l'horizon considéré. Cependant, s'agissant généralement de modèles d'équilibre partiel, ils n'incluent pas les effets de retour sur l'économie globale. Afin de pallier ce manque, certains modèles peuvent intégrer un bouclage avec un modèle macroéconomique MACRO [MARKAL-MACRO, MESSAGE-MACRO] ou peuvent intégrer des élasticités sur les demandes ou les prix afin d'élargir les possibilités d'interprétation des résultats.

Enfin, les travaux récents montrent toutes sortes de variations autour de ces principales catégories. De l'hybridation de ces types de modèles comme IMACLIM (Olivier Sassi, 2008) aux couplages des modèles bottum-up avec les top-down afin de bénéficier des avantages des deux approches comme ETA-MACRO (Manne, 1977) les équipes n'ont de cesse de raffiner les modèles.

Néanmoins, les objets considérés ayant des descriptions très différentes, il est difficile de les faire dialoguer. Finalement, le modèle qui puisse être pertinent face à toutes les questions que l'on peut légitimement se poser sur l'avenir énergétique n'est pas encore disponible et il n'existe pas un modèle meilleur qu'un autre. Chacun ayant été conçu initialement pour répondre à une question spécifique, il faudra jongler avec les différentes améliorations que la communauté des modélisateurs développe activement dans chacune des catégories afin d'être en mesure d'éclairer les choix qui s'offrent à nous.

Pour de plus amples détails concernant la genèse et les types de modèles de prospective, vous trouverez de nombreuses thèses et articles traitant de ce sujet (Crassous, 2008; Després, 2015; Hugues, 2015; Sassi, 2008)…

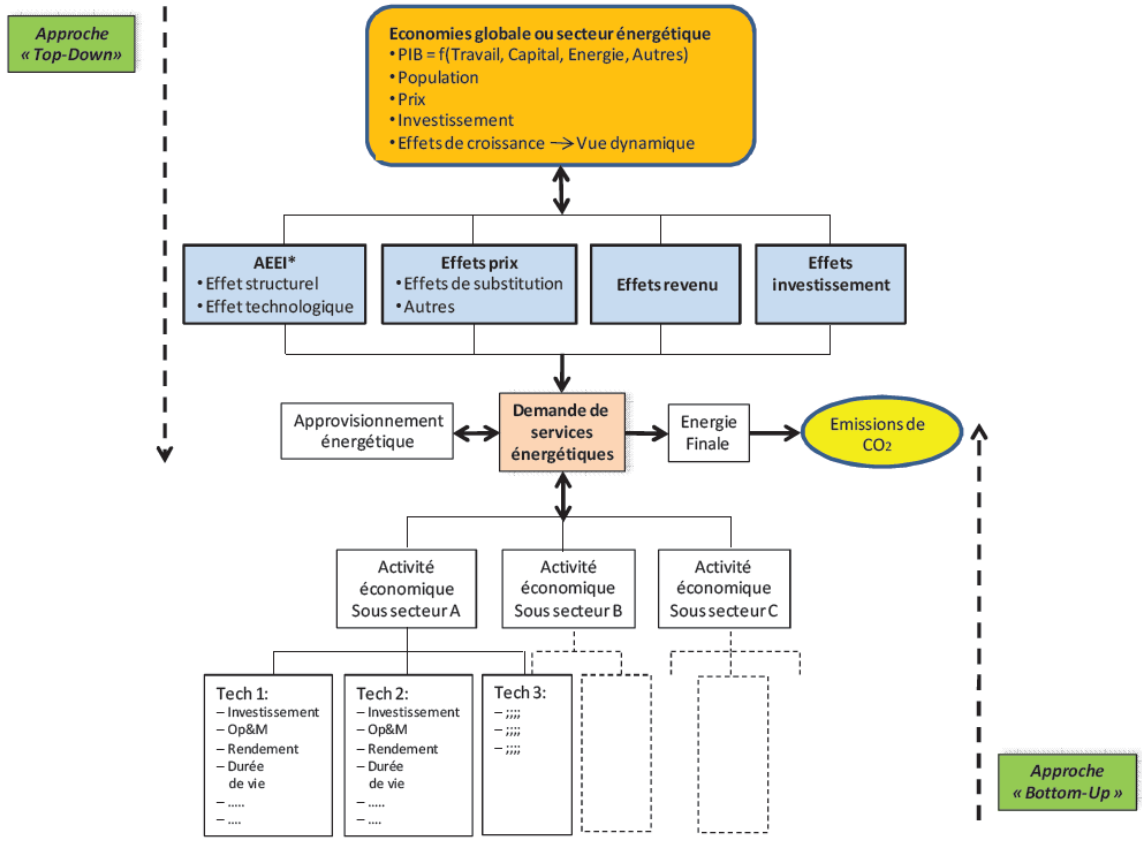


Figure 1 : représentation schématique des grandes approches de modélisation prospectives. (Seck, 2012)

LE GÉNÉRATEUR DE MODÈLE TIMES

Parmi les catégories de modèles que nous venons de présenter, celle que nous avons décidé de développer et d'améliorer au CMA fait naturellement partie des modèles Bottum-up dont nous sommes plus proche.
En effet, l'étude des systèmes énergétiques à partir de leur modélisation nous a orienté vers une approche prospective plus « ingénieur ». Lorsque nous avons abordé la question de la prospective énergétique dès 2001, l'offre des modèles était moins étoffée, et dans le giron des modèles Bottum-up, l'approche MARKAL prédominait. Le générateur de modèle proposé avait le gros avantage d'être un modèle d'optimisation, et de plus, totalement ouvert.

MARKAL (pour MARKet ALlocation) est un générateur de modèle de prospective énergétique développé par l'ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program), consortium de laboratoires sous l'égide de l'AIE qui est en charge du développement des modèles de prospective long terme. C'est un cadre de développement qui utilise un paradigme d'optimisation pour construire la représentation d'un système énergétique de référence (RES : Reference Energy System). L'objet de l'outil est alors de solliciter ce RES à partir de scénarios exogènes d'évolution de la demande d'énergie utile, de prix des énergies ainsi que de contraintes diverses (environnementales, politiques, structurelles …) sur un horizon de temps donné. Le résultat de l'optimisation du système sera l'évolution des technologies constituant le RES (investissement, déclassement et activité) selon un chemin optimal. Le modèle aura fait ses choix technologiques à partir d'une base de connaissances des technologies futures adaptée au RES considéré.

Malgré les diverses variantes du modèle MARKAL (Macro, Micro, Matter, ETL, Stochastic …) ajoutant chacune une nouvelle fonctionnalité, certaines contraintes structurelles liées à différents facteurs restent à être levées : nombre et durée des périodes découpant l'horizon de travail, représentation des technologies et procédés, capacités résiduelles, prise en considération des élasticités sur la demande … Il a été décidé par l'ETSAP de faire évoluer son générateur afin qu'il puisse intégrer toutes ces nouvelles contraintes. MARKAL a donc été fusionné avec un modèle d'optimisation des flux énergétiques EFOM (Energy Flows Optimization Model) développé pour la Commission Européenne (Grohnheit, 1991). Ainsi naquit le model TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) qui allie le meilleur des deux approches et intègre une grande partie des diverses variantes de Markal.

Depuis, TIMES est devenu une référence en terme de modèle d'optimisation bottum-up et a ainsi pu être dérivé en modèle IAM en intégrant les bouclages économiques et environnementaux (TIAM : Times Integrated Assessment Model) (Loulou and Labriet, 2007). Comme nous l'avons dit précédemment, il n'existe pas de modèle parfait, et les atouts en termes de richesse technologique qu'apporte TIMES sont contrebalancés par les manques de représentativité des activités économiques qui peuvent être présentes dans les modèles Top-Down. Nous avons en effet pour tout RES étudié, l'établissement d'un modèle d'équilibre partiel qui ne boucle pas l'économie du système étudié avec le reste de l'économie. Il faudra donc bien veiller à ne pas extrapoler les résultats obtenus en dehors de leur corpus d'hypothèses ayant servi au calcul.

SYSTÈMES RENOUVELABLES

❖ *Introduction*

Mes travaux dans le domaine de la prospective énergétique ont débuté par la définition de cette nouvelle thématique de recherche au CMA entreprise avec Nadia Maïzi dès 2001.
Elle débuta par la prise en main de l'outil MARKAL à travers le suivi de la première thèse entreprise dans le domaine au CMA, celle d'Edi Assoumou, débutée en 2002 et soutenue en 2006. Vinrent ensuite les premiers projets auxquels j'ai pu contribuer.
Lors de mes nombreuses participations aux différentes manifestations de la communauté Markal, j'ai pu faire la connaissance de nombreux chercheurs du domaine et cela nous a conduits à intégrer, par le biais de la participation d'Edi Assoumou lors de son passage à l'Université de Louvain avec Denise Van Regemorter, à collaborer pour le projet Européen NEEDS.
Dans la continuité de ce projet, nous avons pu participer au projet européen RES2020 ("RES2020," n.d.) dans lequel nous avions en charge l'amélioration de la partie française du modèle.

Cette participation fut l'occasion d'entrer dans le cœur du développement et de l'amélioration de certaines représentations au sein même du modèle TIMES multi régions représentant l'Europe à 27 pays. Cette expérience fut ensuite poursuivie par le raffinement du secteur des biocarburants pour le modèle France.

Je vais maintenant présenter mes contributions à ces deux projets et leur impact sur la poursuite de ces activités au CMA.

❖ *Intégration des EnR dans un modèle de prospective*

Les avancées majeures permises par ce projet furent de produire une évaluation chiffrée des politiques de déploiement des directives Européennes pour l'intégration des énergies renouvelables au niveau de l'Europe des 27 (plus l'Islande et la Norvège) à l'horizon 2020. En effet, jusqu'alors,

chaque pays regardait dans le périmètre de ses frontières ce que les contraintes imposées par l'Europe pouvaient avoir sur son système énergétique avec des hypothèses exogènes sur l'effet des autres pays. Le projet RES2020 permit d'établir et d'utiliser un modèle européen 29 zones où chacun des pays fut modélisé avec tous ses secteurs et une représentation de ses propres politiques associées aux directives imposées par l'Europe.

Pour réaliser cette tâche, il fallut dans un premier temps, chercher à améliorer le modèle 29 zones afin d'obtenir une meilleure représentation du système électrique au sein de ce modèle de prospective. En effet, jusqu'alors dans la plupart des modèles nationaux, le vecteur électricité n'était modélisé que par un seul réseau sans distinguer les niveaux de tensions (haute, moyenne et basse). Ces simplifications n'étaient pas acceptables dans le cas d'études plus détaillées sur l'impact de la pénétration des énergies renouvelables sur le réseau au niveau européen.
En effet, l'intégration de moyens de production photovoltaïques ou éoliens peut se faire massivement mais de façon diffuse sur les réseaux moyenne et basse tensions. Ce déploiement, encouragé par les directives, modifie non seulement les pertes associées au transport de l'énergie, ce qui avait déjà été implémenté dans le modèle antérieur développé dans le projet NEEDS ("Needs 2009 Documents," n.d.), mais il est aussi important d'avoir une représentation économique différenciée des tarifs ou coûts variables sur ces différents niveaux de tension. L'injection d'énergie sur les réseaux moyenne et basse tensions sera valorisée de façon très différente selon les politiques incitatives déployées dans les différents pays de l'Union Européenne.

Une réflexion a aussi été menée sur la façon de représenter le plus efficacement possible dans ce type de modèle de long terme la variabilité quotidienne de certaines énergies intermittentes. En effet, les modèles de prospective ne se basent pas sur les prévisions que l'on peut obtenir au niveau de la ressource, mais utilisent les facteurs de charges de chacune des sources appliquées aux périodes de la journée et fonction des saisons. Il est donc impératif de prendre en compte les spécificités de chacun des pays (RES2020, 2009a).

Une deuxième difficulté concernait l'harmonisation des données disponibles en termes de potentiels et ressources en énergies renouvelables (RES2020, 2009b) et particulièrement pour la représentation de la biomasse. Dans les précédents modèles, la biomasse était agrégée en une seule commodité avec un seul potentiel et une ressource unique. Dans le cadre d'études visant à étudier une politique globale d'efficacité énergétique ou de développement sectoriel cela restait suffisant. Néanmoins, dès lors qu'il est question d'évaluer les effets d'une incorporation forcée d'un intrant particulier (pourcentage de biofuel dans l'essence par exemple), il est nécessaire de représenter plus en détail les différents produits inclus dans la ressource biomasse (RES2020, 2009c). Nous avons donc été en charge de renseigner et de valider la désagrégation de la biomasse et des déchets valorisables dans la région France du modèle européen.

Les résultats du projet RES2020 ont permis d'établir un vrai modèle régional ayant une représentation complète des systèmes énergétiques régionaux tous secteurs avec une représentation fine des énergies renouvelables permettant de quantifier les politiques nationales validées par chaque pays.

Une fois le modèle Pan-Européen développé et agrégé, les résultats pour l'Europe ont pu être présentés dans plusieurs workshops organisés dans les différents pays participants. Ainsi j'ai eu l'occasion d'organiser celui pour la France qui s'est tenu à Paris le 12 juin 2009 (Guerassimoff, 2009a), (Guerassimoff, 2009b). Les résultats s'articulaient autour de 4 scénarios (RES2020, 2009d) :

- **BaU** : le « Business as Usual », scénario de référence standard où les politiques de déploiement des EnR ne sont pas imposées.

- **RES** : référence intégrant pour chaque pays représenté les objectifs d'intégration des énergies renouvelables et de réduction des émissions de CO_2 imposés par les politiques.
- **RES-T** : reprenant le scénario précédant avec des échanges possibles de certificats verts entre état membres.
- **RES-30%** : reprenant le scenario RES-T avec une cible de réduction des émissions de CO_2 de 30% au lieu des 20% initialement retenus dans les objectifs des 3 fois 20.

Chacune des simulations autour de ces scénarios a été réalisée sur la période 2000-2030 (avec un calibrage des données à l'année 2000 et 2005).
Les hypothèses sont détaillées afin que les résultats puissent être comparés de façon transparente. Les taux d'actualisation ont été différenciés par secteurs et considérés identiques pour tous les scénarios. Nous avons procédé de même pour les prix des combustibles, les hypothèses démographiques, projections macroéconomiques et de demandes utiles.

Notre rôle dans le projet fut d'intégrer les politiques et contraintes pesant sur tous les types de production d'énergies renouvelables et de tester la cohérence de l'ensemble sur un jeu de scénarios que nous avons établis au sein du projet.

❖ *Résultats du projet RES2020*

Voici quelques résultats qui ont permis d'éclairer les futurs possibles au niveau européen en termes de développement des énergies renouvelables.
Certains montrent, par exemple, au niveau européen la consommation d'énergie renouvelable par source (électricité, chaleur, bioénergie et autres renouvelables) Figure 2 ou le mix de production d'électricité Figure 3 en fonction des scénarios établis.

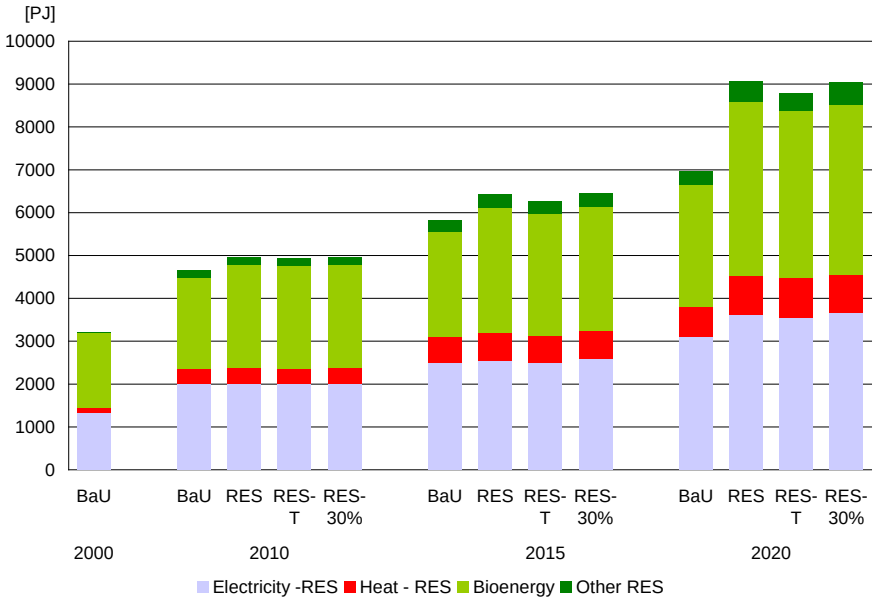


Figure 2 : consommation d'énergies renouvelables pour l'EU 27 + Norvège et Islande

La consommation d'énergie renouvelable est plus que doublée à horizon 2020. L'effort supplémentaire engendré par la mise en œuvre des politiques est assuré à plus de 50% par les bioénergies. L'introduction des échanges permet de montrer qu'il existe un surplus de production EnR dans le scénario RES de référence car la baisse engendrée par l'établissement des mécanismes d'échange (RES-T) aboutit exactement à la cible des 20%. Le renforcement de la contrainte

d'émission de CO_2 ne génère pas à une augmentation de la consommation d'EnR, mais plutôt à une augmentation du nucléaire, CCS[2] et une baisse de la demande.

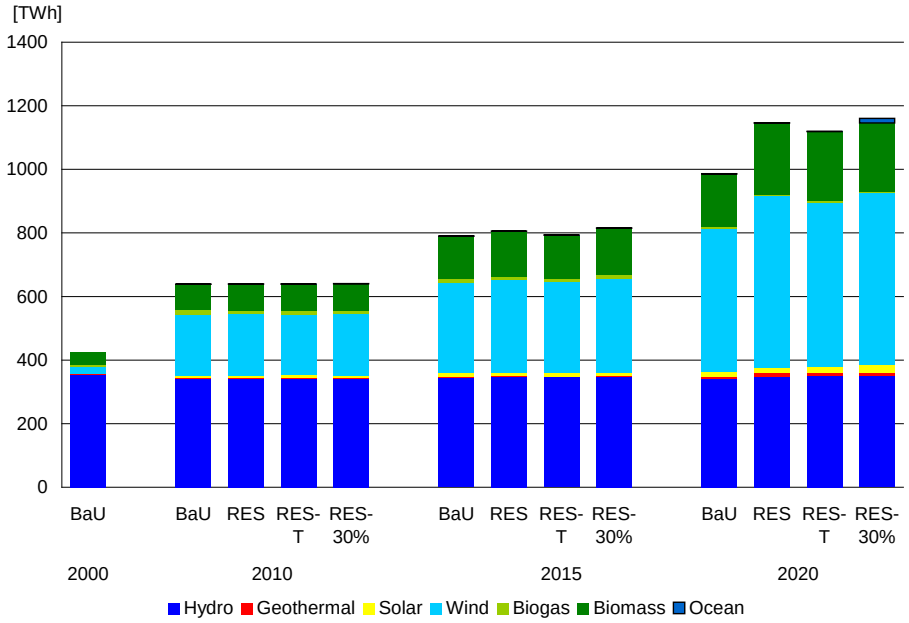


Figure 3 : Production d'électricité renouvelable au niveau EU27+Norvège et Islande

Le mix de production électrique renouvelable montre une large pénétration de l'éolien et de la biomasse tandis que l'hydroélectricité reste stable sur la même période. L'introduction des mécanismes d'échanges de certificats aboutit à un léger recul de la production renouvelable alors que la contrainte supplémentaire sur les émissions de CO_2 n'engendre qu'une légère apparition des énergies marines.

Concernant les résultats pour la France dans ce contexte, nous avons pu montrer la répartition par secteur de l'usage des EnR.

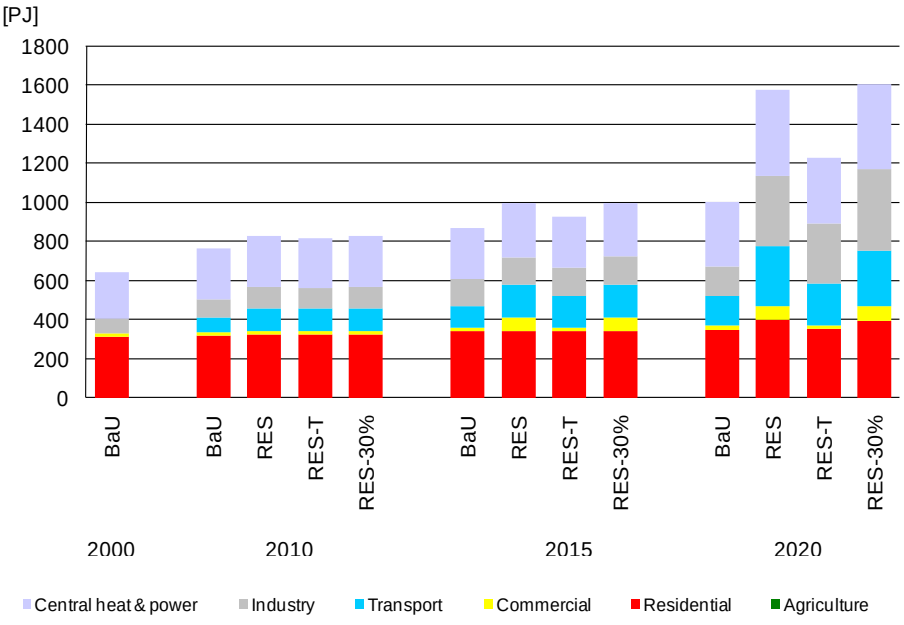


Figure 4 : Répartition des usages des sources EnR pour la France

[2] CCS : Carbon Capture and Sequestration

Nous constatons une augmentation de l'usage des EnR de 55% pour le BaU jusqu'à 145% pour le scénario RES sans échanges de certificats. L'usage se fait majoritairement dans le transport et l'industrie alors qu'elle n'est pas développée dans le résidentiel tertiaire et dans la production d'électricité et de chaleur.

Chacun des scénarios étudiés est aussi quantifié pécuniairement. S'agissant d'un modèle d'optimisation dont la fonction objectif est une minimisation du coût global actualisé, il est simple de comparer les résultats des différents scénarios. Néanmoins, le but étant l'établissement de recommandations pour satisfaire les objectifs d'intégration des énergies renouvelables, les résultats économiques sont à analyser avec leurs contraintes et leurs limitations inhérentes à l'établissement d'un modèle d'équilibre partiel. Non seulement tout le reste de l'économie n'est pas représenté mais les études paramétriques (comme l'influence du taux d'actualisation ou des courbes d'apprentissages technologiques) n'ont pas été abordées. Malgré ces manques, ce type d'étude technologique détaillée est indispensable pour alimenter la réflexion quand on raisonne à une échelle Européenne. Il permet ainsi d'établir des directives pour l'amélioration des modèles afin de proposer des résultats de plus en plus pertinents.

- *Zoom sur la biomasse*

Suite à ce projet, et au regard des résultats et développements entrepris, l'amélioration des modèles s'est poursuivie au CMA selon plusieurs axes.
D'une part, la représentation du système électrique avec toutes ses contraintes est poursuivie par mes collègues et a donné lieu à plusieurs thèses (Bouckaert, 2013; Drouineau, 2011; Krakowski, 2016) permettant une prise en compte des aspects sécurité et fiabilité qui n'étaient pas considérés dans ce type de modèle mais qui restent indispensables lorsque l'on s'intéresse à une intégration massive d'énergie électrique intermittente.
D'autre part, la forte pénétration de la biomasse dans les futurs mix renouvelables liée à la diversité technologique et à sa disparité spatiale nous a conduit à poursuivre l'amélioration de sa représentation au sein de nos modèles. Nous avons donc entrepris, par le biais du projet VALERBIO[3] mené en collaboration avec l'INRA[4], l'institut technologique FCBA[5] et l'IFP[6], d'améliorer la filière biomasse au sein de notre modèle pour la France. Ce projet, financé par la fondation TUCK[7], avait pour objectif d'étudier à l'horizon 2050 les concurrences entre usages énergétiques possibles de la biomasse. (Prieur et al., 2010)

La transcription au niveau national des directives européennes œuvrant à la promotion des biocarburants a donné l'occasion de réaliser de nombreuses études visant à établir différentes voies permettant d'atteindre les objectifs fixés à une substitution progressive des carburants fossiles par des biocarburants jusqu'à 10% en 2015. Face à ce développement des biocarburants, viennent s'ajouter des usages énergétiques complémentaires comme la production d'électricité et de chaleur qui concurrencent la ressource. Le projet Valerbio devait proposer des scenarios permettant d'analyser les compétitions entre ces usages pour la mobilisation de la ressource biomasse agricole et forestière notamment lignocellulosique. La conjonction des compétences des partenaires de ce projet a permis d'entreprendre la réalisation d'un modèle de prospective énergétique français plus détaillé. Il a été décidé de spatialiser la ressource en biomasse et de regarder, selon les technologies d'usage, quelles technologies de conversion pouvaient émerger.

[3] Valorisation énergétique de la biomasse
[4] INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
[5] FCBA : Institut technologique de la Forêt, de la Cellulose, du Bois-construction et de l'Ameublement
[6] IFP : Institut Français du Pétrole
[7] TUCK : Fondation reconnue d'utilité publique pour le développement dans le domaine de l'énergie et du développement durable

Nous avons pris le parti de nous focaliser uniquement sur un modèle dédié à la biomasse. Le système énergétique de référence a dont été construit autour de la ressource et des usages dédiés à la biomasse sans inclure la représentation des autres secteurs énergétiques. Ce choix est justifié par le type de résultats attendus. En effet, nous ne regarderons que l'évolution des technologies dédiées à la production et à l'usage de la biomasse énergie notamment les biocarburants en fonction des taux d'usage ou d'incorporation imposés par les politiques de promotion de ce vecteur renouvelable. Ces contraintes n'étant pas trop fortes, on peut faire l'hypothèse que ce déploiement n'influencera pas trop les autres secteurs d'activités qui pourraient utiliser les mêmes ressources.
Voici sur la figure ci-dessous le système énergétique de référence que nous avons décidé de représenter (Guerassimoff and Assoumou, 2010).

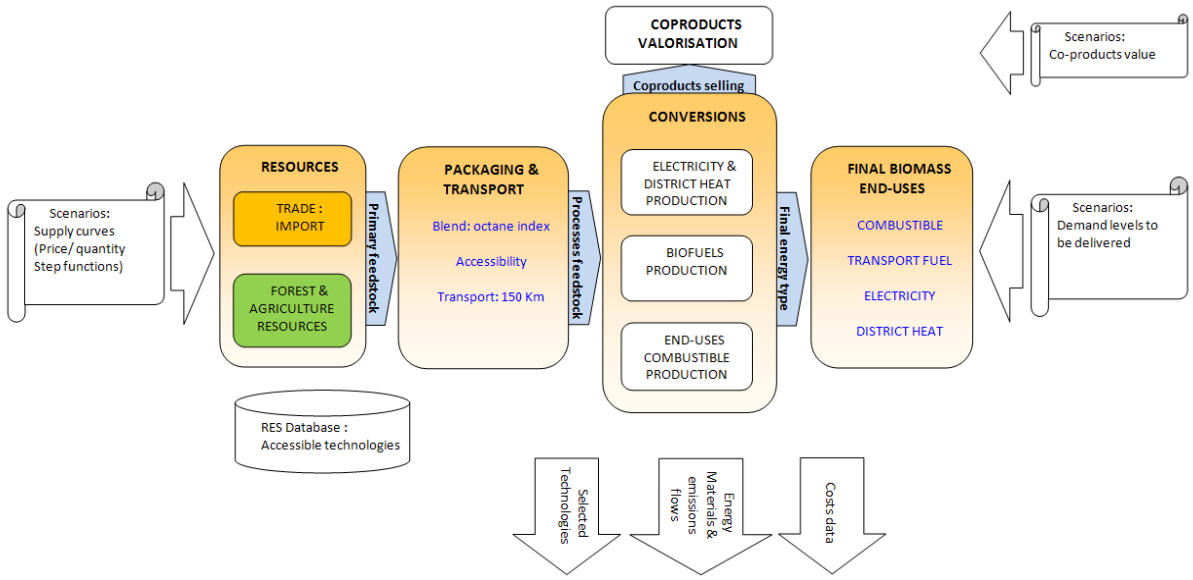


Figure 5 : Système énergétique de référence du projet Valerbio

❖ *Caractérisation et évaluation de la ressource*

La **ressource agricole** mobilisable pour la production d'énergie a été évaluée à partir du surplus qui n'entre pas en compétition avec les usages alimentaires. Nous avons pris en compte la *betterave*, le *tournesol*, le *miscanthus* et *switchgrass* ainsi que le *soja*. Concernant le *maïs*, le *blé*, le *colza* et le *triticale*, ces plantes ont été représentées en trois parties : la plante entière, les graines et la paille.

La **ressource forestière** a été décomposée en trois grandes catégories selon ses caractéristiques dimensionnelle et physique : le *bois d'œuvre* (BO), le *bois industrie/bois énergie* (BIBE) et le *menu bois* (MB). La ressource forestière présente une particularité par rapport à la ressource agricole qui peut la pénaliser fortement : il s'agit de son accessibilité. Nous avons donc défini quatre types d'accessibilités (facile, modérée, difficile et très difficile) qui seront discriminées par une augmentation du coût à la tonne qui sera évalué « bord de route ». Ce découpage en qualité et accessibilité permet une représentation plus pertinente de la ressource réellement affectable à un usage énergie.

Enfin, nous avons inclus une catégorie spécifique par sa dynamique de récolte et sa représentativité sur le sol français. Il s'agit des **Taillis à Courte Rotation** (TCR) qui sont les espèces telles que l'eucalyptus, le peuplier, le saule et le faux acacia.

À partir de ces espèces, l'INRA et le FCBA ont évalué les ressources disponibles sur l'horizon de travail que nous nous sommes fixés (2000-2050) avec un pas de dix années pour chaque département (Millet, 2010; Nguyen Thi et al., 2010).

La granulométrie spatiale étant trop importante au niveau du département, nous avons regroupé ces derniers en neuf régions représentatives disposant chacune de leurs potentiels et descriptions économiques (couts de production et de transport).

Concernant les couts de transport, comme nous ne localisons pas les unités de production, nous avons mis une distance moyenne de transport de la ressource à 150 km. Nous avons procédé de façon identique pour les unités de transformation de la matière (trituration) afin d'obtenir les entrées différenciées nécessaires au fonctionnement des unités de transformation en biocarburant, chaleur, électricité et coproduits issus de ces technologies.

❖ *Technologies représentées*

La ressource et les variables d'entrée de nos technologies identifiées, il faut maintenant fournir au modèle toutes les technologies de conversion de cette biomasse en énergie finale qui sera utilisée dans les technologies de demande finale. L'IFP a identifié les caractéristiques technico-économiques des filières de conversion actuelles et futures prévues sur l'horizon temporel étudié (Lorne et al., 2010).
Au total **six technologies** de première et seconde génération ont été représentées et initialisées aux capacités présentes sur le sol français à l'année 2000. Elles concernent la production d'éthanol d'une part et de biodiesel d'autre part. Chacune de ces technologies dispose de ses propres caractéristiques de trituration et de production de coproduit.

En effet, certaines technologies de production produisent des coproduits valorisables sur les marchés et permettent une meilleure rentabilité. Nous les avons donc pris en considération pour chacune des filières tels que la *glycérine, le propane, le naptha, tourteaux de colza, drèches, vinasses*. Ne pouvant présager de l'évolution des marchés de ce type de produits, nous avons considéré leur valorisation aux conditions économiques connues lors de la réalisation de ce projet qui provient des bases de données telles que Platts, Reuters et Oil Word à l'année 2008.

❖ *Scenarios étudiés*

Une fois ces données renseignées et implémentées, nous avons construit différents scénarios, permettant d'apprécier le développement des filières selon différentes contraintes, issues d'une part de la ressource elle-même, et d'autre part des évolutions politiques prévues.

Concernant les **ressources**, nous avons défini :

Trois types de scénarios pour les ressources forestières :
- *Business as Usual* (BaU)
- *Tout pour l'énergie* : représente une meilleure dynamique pour l'énergie que pour l'industrie du bois
- *Industrie dynamique* : représente un dynamisme accru de 20% pour la construction en bois

Deux pour les TCR :
- Disponibilité *moyenne* et *forte*

Deux pour les pour la disponibilité et les prix des ressources agricoles :
- *Business as Usual* (BaU)

- *Tout pour l'énergie* : représente une forte demande du secteur énergie pour une demande alimentaire constante

Deux catégories de prix, *fort* et *faible*, pour prendre en compte la volatilité des prix des ressources agricoles.

À partir de ces scénarios, six combinaisons (qui nous servirons de scénarios de potentiels pour solliciter notre modèle) ont été établis :

- **P1** : BaU pour les ressources forestières, BaU et **prix bas** pour la ressource agricole et pas de TCR
- **P1b** : BaU pour les ressources forestières, BaU et **prix haut** pour la ressource agricole et pas de TCR
- **P2** : Industrie bois dynamique, **tout pour l'énergie** pour les ressources agricoles avec prix hauts et forte disponibilité pour les TCR
- **P2b** : Industrie bois dynamique, **BaU** pour les ressources agricoles avec prix bas et forte disponibilité pour les TCR
- **P3** : Tout pour l'énergie pour la ressource forestière, tout pour l'énergie pour les ressources agricoles avec prix hauts et **forte disponibilité** pour les TCR
- **P3b** : Tout pour l'énergie pour la ressource forestière, tout pour l'énergie pour les ressources agricoles avec prix hauts et **disponibilité moyenne** pour les TCR

Le modèle a la possibilité d'importer des ressources forestières et de l'éthanol mais à un prix deux fois plus important que la ressource locale. Si ce vecteur apparait, il permettra de conclure à un manque de ressource nationale.

Concernant la **demande finale d'énergie** produite à partir de biomasse, nous avons établi nos scénarios en nous basant sur les contraintes politiques retenues par le Comité Opérationnel n°10 du Grenelle de l'Environnement (ComOp 10)(Lenoir and Liébard, 2007).

Trois scénarios de demande ont été établis :

- **D1** : La demande finale est évaluée à 20 Mtep pour 2050. Scénario pessimiste au regard des objectifs du ComOp 10 qui prévoyait ce niveau en 2020.
- **D2** : La demande finale est évaluée à 40 Mtep pour 2050. L'objectif des 20 Mtep en 2020 du ComOp est réalisé et nous prévoyons une augmentation de la demande en bioélectricité due à la pénétration des véhicules électriques.
- **D3** : La demande finale est évaluée à 40 Mtep pour 2050. L'objectif des 20 Mtep en 2020 du ComOp est réalisé et nous prévoyons une augmentation du biocarburant aviation qui atteint 20% du total du secteur du transport (route et air).

Ces scénarios permettent de déterminer les limites du potentiel biomasse pour la France ainsi que le mix technologique optimal associé.

❖ *Résultats du projet VALERBIO*

Je présente ici quelques résultats obtenus à partir du modèle établi et sollicité par les scénarios construits pour le projet Valerbio. Je montre pour le premier scénario D1, le mix technologique optimal obtenu ainsi que la répartition de la ressource biomasse utilisée. Ensuite, je discute les résultats pour les deux autres scénarios.

Le premier scénario (D1) devant satisfaire 20 Mtep de consommation de bioénergie, nous remarquons une utilisation plus importante des produits agricoles avec une prédominance du

biodiesel malgré une forte augmentation de la part de marché du bioéthanol qui atteint 37% en 2050 (Figure 6, Figure 7).

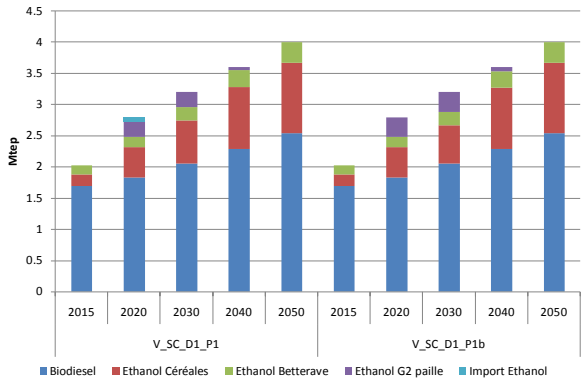


Figure 6 : Production de biocarburants pour P1

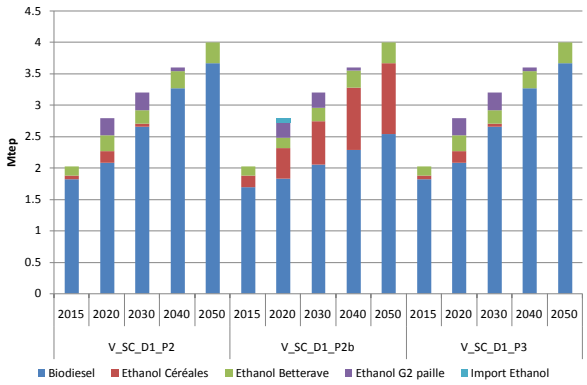


Figure 7 : Production de biocarburants pour P2/P3

On peut remarquer un certain paradoxe concernant l'import d'éthanol qui intervient dans le scénario des potentiels agricoles à bas prix (P1) en 2020 au lieu de le produire à partir de l'éthanol G2. Ceci est dû au fait qu'il est moins intéressant de construire une unité de production supplémentaire pour fournir le surplus d'éthanol G2 quand les prix restent bas. Il devient plus intéressant d'en construire une pour les prix plus élevés sur le long terme, permettant ainsi de rentabiliser ces unités sur l'horizon d'étude.

On peut remarquer que cet éthanol G2 utilise de la ressource paille qui est par ailleurs massivement utilisée pour un usage chaleur (Figure 8)

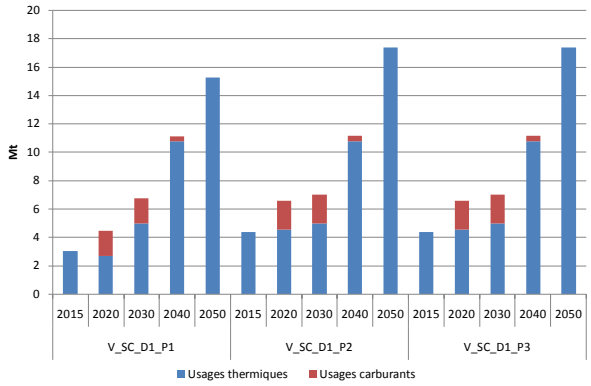


Figure 8 : Allocation de la paille pour la demande D1

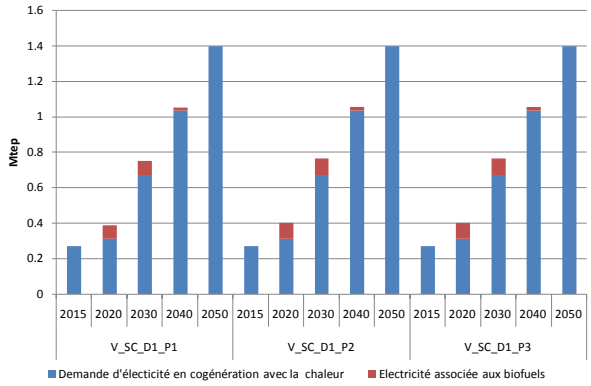


Figure 9 : Production d'électricité à partir de biomasse pour la demande D1

Les orientations du ComOp ne considèrent que la production d'électricité en cogénération avec la production de chaleur afin de maximiser le rendement de conversion. La demande fixée par les scénarios ne comptabilise que ce type d'électricité. Il est donc intéressant de noter un surplus d'électricité (Figure 9) produit en tant que coproduit pour la technologie éthanol G2 (entre 20 et 25% en 2020 et entre 10 et 12% en 2030).

Ce surplus pourrait avantageusement être intégré à la production d'électricité à partir de cogénération/biocarburant afin de soutenir cette filière, ce qui permettrait en outre de relâcher l'objectif de production électrique de presque 30%.

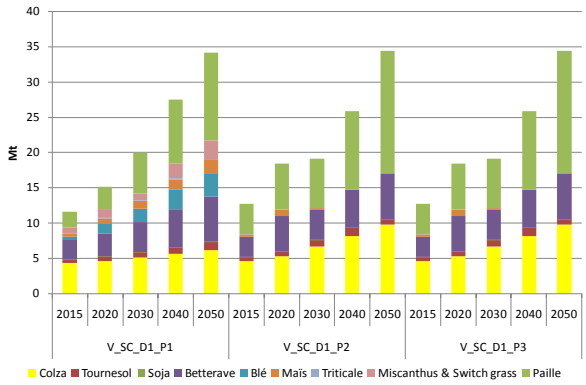


Figure 10 : Mobilisation de la ressource agricole pour une demande D1

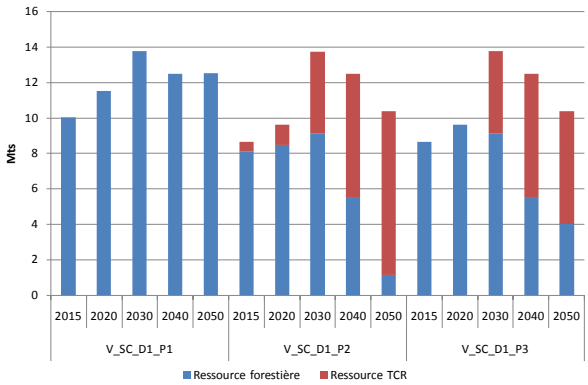


Figure 11 : Mobilisation de la ressource forestière pour une demande D1

Concernant l'évolution des ressources agricoles mobilisées (Figure 10), les forts potentiels des scénarios P2 et P3 montrent la disparition du blé grain, maïs grain, switchgrass et miscanthus à la faveur des oléagineux et de la paille. Concernant la ressource forestière, la disponibilité des TCR permet une réduction de l'usage bois en provenance des forêts, phénomène accentué en cas de développement fort des autres usages du bois (P2 filière bois dynamique Figure 11).

Ce type de résultats permet de mettre en évidence les technologies pertinentes pour la production de biocarburants selon les disponibilités des ressources.

Voyons maintenant quelques résultats importants lorsque la demande double (passant de 20 à 40 Mtep) avec, d'une part, le développement de la production d'électricité (scénario D2) et, d'autre part, le développement du carburant aviation (scenario D3).

Les résultats pour un scénario BaU sans ressources TCR (potentiels de type P1) montrent une importation d'éthanol quel que soit le prix des ressources agricoles ainsi qu'une production BTL paille et bois (Figure 12, Figure 13). Par ailleurs, malgré un cout plus élevé, le BTL[8] ayant un PCI[9] massique important et un rendement de conversion plus élevé, il permet une utilisation moins grande des ressources et apparait donc dans le mix technologique optimal (Figure 13).

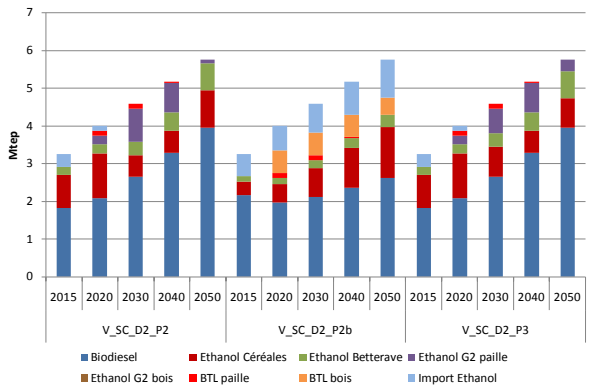


Figure 12 : Production biocarburants pour P2/P3 et D2

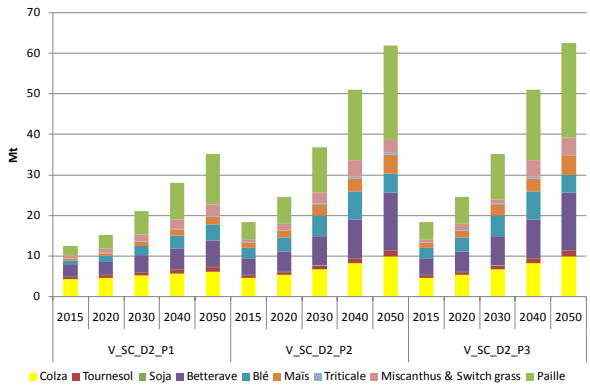


Figure 13 : Mobilisation de la ressource agricole pour D2

[8] BTL : Biomass To Liquid
[9] PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

L'objectif de doublement de la production de bioénergies entraine une mobilisation totale de la ressource disponible et se traduit également par un recours aux importations. La ressource forestière montre un déficit malgré l'usage des TCR dans les deux scénarios de demande D2 et D3. Les dynamiques sont les mêmes mais le volume est plus important pour le scénario D3 (forte demande de biocarburant aviation). Les spécifications techniques étant plus sévères, la filière BTL devient plus robuste sur l'horizon de calcul au détriment de l'éthanol G2. (Figure 14, Figure 15).

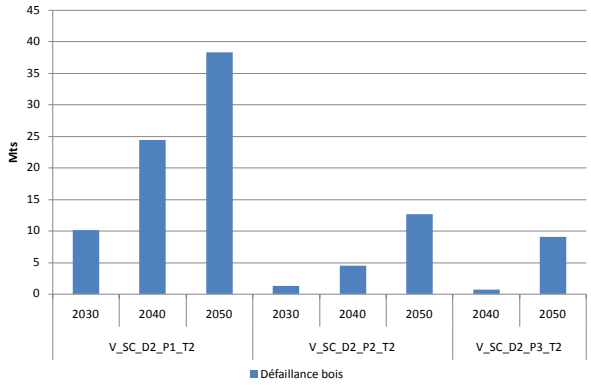


Figure 14 : Défaillance de la ressource bois scénario D2

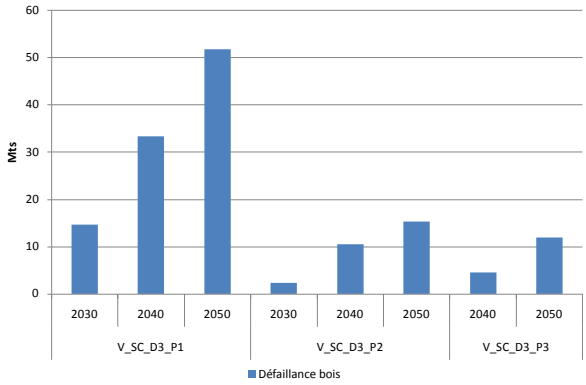


Figure 15 : Défaillance de la ressource bois scénario D3

L'établissement de ce type de modèle dédié à une filière permet de quantifier les limites des politiques envisagées pour satisfaire les critères d'incorporations de biocarburants. En effet, les scénarios à 40 Mtep ne peuvent être satisfaits par les ressources agricoles et forestières retenues et nous orientent vers des importations de bioénergie.
Nous avons pu mettre en évidence les limites de production entre 25 et 35 Mtep dans le cas le plus favorable.

Un tel projet nous a permis, d'une part, de réaliser une amélioration de la représentation de la filière biomasse dans nos modèles de prospective ; d'autre part, d'étudier les sensibilités de la ressource et de la maturité technologique pour différentes contraintes qui pourraient peser sur la demande de de biomasse (véhicules électriques, biocarburant aviation).

Suite au projet Valerbio, nous avons pu poursuivre l'étude en ajoutant le cas de la Suède. Avec Niklass Forsell, post-doctorant au CMA, en collaboration avec Dimitirs Athanassiadis de l'Université des Sciences Agricoles de Suède, nous avons pu continuer le développement du modèle et le confronter au cas suédois. Un autre découpage régional ainsi que de nouveaux scénarios de déploiements ont été étudiés, comparés puis publiés dans la revue Renewable Energy en 2013 (Forsell et al., 2013), article présent en annexe.

Les activités de développement du modèle français dédié aux bioénergies ont été poursuivies au CMA par Edi Assoumou par le biais d'une thèse réalisée par Paul Hugues en collaboration avec le groupe Avril, pionnier des biocarburants, soutenue le 10 mars 2015 (Hugues, 2015). À l'issue de cette thèse, le CMA possède un outil complet performant pour l'analyse de l'évolution des filières de bioénergies au niveau national.

❖ *Conclusions*

La recherche autour de la représentation des énergies renouvelables au sein de nos modèles de prospective est toujours en cours au CMA. Que ce soit pour notre modèle France, Monde ou des modèles régionaux qui ont pu être établis, cette problématique sera toujours une priorité pour nos

modèles long terme vu les objectifs de pénétration annoncés. Il est impératif d'en avoir une représentation la plus fidèle possible, et ceci, quelle que soit l'échelle spatiale ou temporelle choisie. Cette représentation affinée dans nos outils d'aide à la décision contribue à rendre les résultats de nos analyses plus représentatifs et robustes.

En parallèle de ces recherches sur les filières renouvelables qui sont actuellement poursuivies par mes collègues, je me suis penché sur la représentation d'autres secteurs au sein de ces mêmes modèles de prospective, notamment le système industriel.

En effet, durant notre implication dans le développement des modèles, tous les secteurs représentés étaient assez agrégés pour que les données nécessaires à la modélisation puisse être disponibles au niveau européen, et ce, pour tous les secteurs d'activité. Le secteur industriel représentant une grande part des consommations mais aussi des émissions de gaz à effet de serre, il nous a semblé important de mieux le représenter dans nos modèles.

SYSTÈMES INDUSTRIELS

La consommation d'énergie du système industriel mondial représente le tiers de la consommation d'énergie finale (WEO, 2016). Les différents exercices de prospective long terme au niveau mondial s'accordent sur une certaine stabilité en pourcentage de ce secteur à l'horizon 2050, et ce, quelles que soient les contraintes imposées dans les différents scénarios (AIE, 2015; EIA, 2016).
Ces indicateurs restent cependant très globaux.
D'une part, leur construction est basée sur un taux de croissance annuel moyen variant selon la production, la structure industrielle et l'intensité énergétique des différentes régions du monde.
D'autre part, un taux de réduction des consommations au sein de ce secteur est déterminé pour représenter les progrès technologiques, l'amélioration de l'efficacité énergétique et le recyclage donnant tout au plus une répartition par type d'énergie.

Quand on se place au sein d'une région (à la maille d'un pays ou de l'Europe par exemple), il est intéressant de disposer d'un outil de prospective capable de fournir des informations plus détaillées sur les technologies employées dans un secteur particulier. Cet outil nous permettra de proposer et quantifier des améliorations structurelles induisant une réduction de la consommation spécifique mais aussi de l'impact environnemental du secteur étudié. Dans ce cadre, l'approche Bottum-up est la plus adaptée car technologiquement très détaillée.
J'ai donc entrepris, en partenariat avec EDF, de lancer un programme de recherche sur la modélisation du secteur industriel en commençant par les industries les plus grosses consommatrices d'énergie (les IGCE[10]), puis dans un second temps nous avons abordé les autres industries dites diffuses (ID[11]).

Je montre dans cette partie la démarche ainsi que quelques résultats de ce programme autour des deux thèses que j'ai pu encadrer dans ce domaine (Djemaa, 2009; Seck, 2012).

[10] IGCE : Industrie Grande Consommatrice d'Energie
[11] ID : Industrie Diffuse

❖ *Segmenter pour une représentation pertinente*

Le secteur industriel est très vaste et les sous-secteurs extrêmement nombreux.
Différentes classifications sont disponibles pour structurer l'industrie en fonction de son activité. Au niveau international (CITI[12]), européen (NACE[13]) et national (NAF[14]), chacune est issue de son niveau directement supérieur et a subi plusieurs révisions au fil du temps.

Depuis janvier 2008, la NAF révision 2 possède 88 divisions communes aux deux classifications supérieures (NACE 2 et CITI), 615 classes communes avec la NACE (NACE 4) et enfin 732 sous classes françaises. Les organismes de statistiques réalisent régulièrement des enquêtes afin de recueillir les données nécessaires à l'établissement d'indicateurs du secteur industriel. Cependant, ces classifications ayant été définies pour ordonner les activités ; elles ne permettent pas de distinguer la structure technologique ou la part de l'énergie présente pour chacune de ces catégories.

La première étape à entreprendre est donc de classer correctement les types d'industries selon des critères qui nous permettront la meilleure représentation possible compatible avec les études technico-économiques de long terme que nous comptons réaliser.
En effet, la méthodologie de modélisation ne pourra être identique selon le chemin technologique employé dans les différents types d'industrie.
Nous retrouvons cette problématique de délimitation des IGCE et de l'ID dès qu'une étude est menée dans ce domaine et ce, qu'elle que soit son application. Dans les pays européens, certains se basent sur la directive du conseil restructurant le cadre communautaire de taxation des produits énergétiques et de l'électricité (DIRECTIVE 2003/96/CE, 2003) qui donne cette définition « *On entend par «entreprise grande consommatrice d'énergie», une entreprise, telle que définie à l'article 11, dont les achats de produits énergétiques et d'électricité atteignent au moins 3 % de la valeur de la production ou pour laquelle le montant total des taxes énergétiques nationales dues est d'au moins 0,5 % de la valeur ajoutée.* » D'autres intègrent l'intensité énergétique, le type de produits fabriqués, ou se basent simplement sur des considérations historiques de la segmentation sectorielle.

Dans le cadre de la thèse d'Ahcène Djemaa traitant des IGCE (Djemaa, 2009), après analyse de ces études, le choix s'est porté sur les plus intensives des IGCE qui sont par ailleurs les industries soumises aux quotas d'émissions de gaz à effets de serre, à l'exception du secteur du raffinage et du secteur de la chimie qui n'ont pas été étudiés dans le cadre de cette thèse. Ci-dessous les IGCE choisies pour être modélisées dans le cadre français et européen.

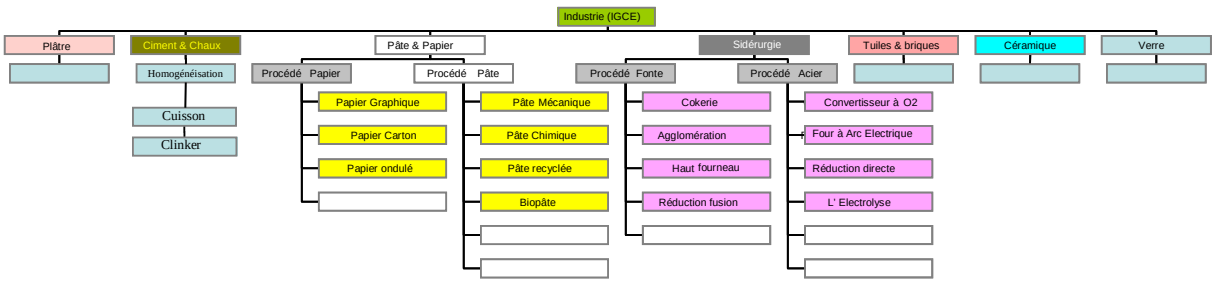


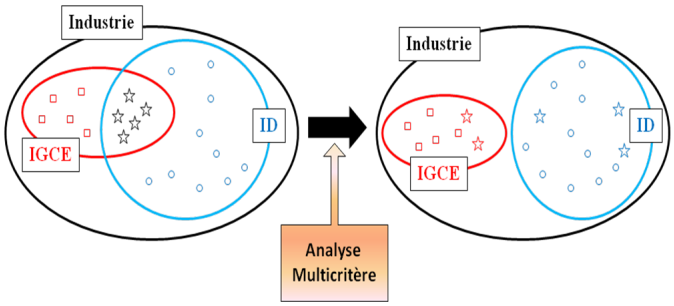
Figure 16 : Répartition des IGCE dans le cadre de la modélisation retenue (Djemaa, 2009)

[12] CITI : Classification Internationale Type des Industries (ONU)
[13] NACE : Nomenclature d'Activités de la Communauté Européenne (Eurosatat)
[14] NAF : Nomenclature d'Activités Françaises (INSEE)

Le périmètre des IGCE a été déterminé pour les industries les plus importantes du secteur sans que nous ayons eu besoin de raffiner sa frontière avec l'ID. Nous ne pouvions, dans le cadre du temps consacré à une thèse, être en mesure d'étudier et de modéliser tous les secteurs des IGCE et avons délibérément laissé certains secteurs (dont le classement pouvait être à la limite des deux catégories) afin de nous concentrer sur la méthodologie de modélisation et l'analyse des résultats obtenus pour ces sept secteurs.

Nous avons donc entrepris cette recherche de la segmentation du secteur industriel de façon plus approfondie lors du démarrage de la seconde thèse de Gondia Seck dédiée à la modélisation du secteur de l'ID (Seck, 2012). Lorsque l'on veut modéliser un secteur aussi diversifié que l'industrie diffuse, il faut s'assurer que la représentation des sous-secteurs puisse être suffisamment générique afin d'être ensuite en mesure de généraliser l'approche de modélisation choisie. Si la frontière n'est pas clairement identifiée, alors nous risquons de ne pas utiliser la méthode la plus adaptée pour la représentation du secteur étudié, ce qui induirait des biais supplémentaires dans l'analyse des résultats.

Afin de lever toute ambiguïté dans le choix de notre périmètre de modélisation, nous avons entrepris une analyse multicritère permettant de lever les incertitudes pesant sur les industries « frontières ». par exemple, l'industrie automobile ou l'industrie laitière se trouvent tantôt dans les IGCE tantôt dans l'ID selon le sujet traité dans la littérature.



Nous avons vu précédemment les nomenclatures à notre disposition pour recenser les industries selon leurs activités. Celles-ci peuvent être très détaillées (712 classes au niveau français avec la NAF). Cependant, la modélisation prospective se basant sur des données réelles ainsi que sur des projections de demande sur l'horizon de travail, il faut trouver le bon compromis entre la disponibilité des données et une désagrégation des secteurs suffisamment détaillée. Celle-ci permettra des analyses sur l'évolution technologique du secteur étudié mais pour lesquelles les données nécessaires à la modélisation sont disponibles. Dans le cadre de notre projet, nous avons opté pour la nomenclature NACE Rév. 1.1 de 2003. Ce choix permet d'accéder à une approche européenne avec un bon niveau de détail structurel tout en ayant accès aux données nécessaires à notre modélisation.

Il est maintenant nécessaire de cadrer la définition sectorielle de notre étude dans cette nomenclature. Le choix s'est porté sur une représentation de tous les secteurs de l'industrie de consommation d'énergie finale. Ceux-ci englobent tous les secteurs de l'industrie extractive et de l'industrie manufacturière. Cependant nous avons exclu le secteur de production et conversion de l'énergie. Notre périmètre industriel est donc représenté sur la figure ci-dessous.

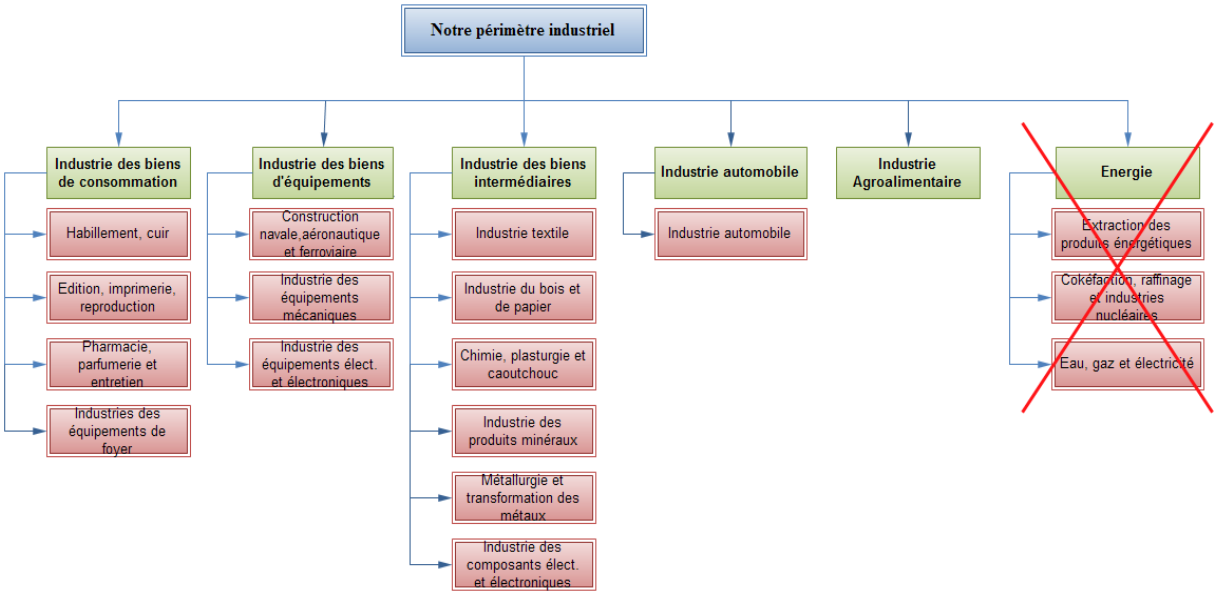


Figure 17 : Périmètre industriel retenu (Seck, 2012)

Notre périmètre industriel défini et la nomenclature choisie, l'analyse multicritère peut être entreprise pour évaluer les frontières de notre industrie diffuse. L'étude se base sur des méthodes classiques d'apprentissage non supervisé (clustering ou agrégation) qui s'appuient sur les trois critères suivants que nous avons établis :

- L'intensité énergétique (rapport de la consommation à la valeur ajoutée (critère plus pertinent pour l'industrie)) (GWh/M€)
- Part du coût énergétique dans la valeur de production (%)
- Quantité d'énergie consommée par site de production (GWh/site)

Nous avons procédé en deux étapes.

Tout d'abord une méthode de clustering hiérarchique est appliquée afin d'évaluer le nombre de groupes qui peut être déterminé. La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est utilisée pour laquelle une méthode de Ward est retenue pour la minimisation de l'augmentation de l'inertie interclasses. Cette méthode classique permet de mettre en évidence trois groupes principaux. L'un représente les industries faiblement consommatrices d'énergie, mais très intensives en emploi et avec des produits à forte valeur ajoutée, qui sont prises comme industrie diffuse (ID avec 82 secteurs). Les deux autres groupes rassemblent les industries très énergivores mais largement moins intensives en emplois et un nombre moins important de sites industriels sur le territoire. Nous avons ainsi appelé ces deux groupes les IGCE fortes (2 secteurs) et IGCE faibles (15 secteurs).

Afin de consolider et valider la segmentation établie à partir de la CAH, la méthode de clustering par partition traditionnelle des K-means est appliquée. À partir du même nombre de groupes (clusters) déterminé par la CAH précédente, la méthode va répartir les individus (industries) dans ces groupes en minimisant la distance entre les individus d'un groupe tout en maximisant l'écart entre les groupes dont le nombre a été fixé a priori (3 dans notre cas). Les résultats sont tout à fait comparables (voir tableau ci-dessous) permettant ainsi de valider notre découpage sectoriel pour la suite de notre travail.

Cluster CAH	Cluster Kmeans	Stat	Value		kmeans_1	kmeans_2	kmeans_3	Somme
		Tschuprow's t	0,902317	**CAH_1**	85	0	0	**82**
		Cramer's v	0,902317	**CAH_2**	0	0	2	**2**
		Phi2	1,628352	**CAH_3**	2	10	0	**15**
		Chi2 (p-value)	161,21(0.0)	**Somme**	**87**	**10**	**2**	**99**
		Lambda	0,705882					
		Tau (p-value)	0,6724 (0.0)					
		U(R/C)(p-value)	0,6289 (0.0)					

Table 1 : Comparaison entre CAH et K-Means (Seck et al., 2016)

Cette segmentation a permis d'établir les limites de notre secteur de l'industrie diffuse pour la France aux valeurs suivantes :

- Intensité énergétique inférieure à 6 GWh/M€
- Part de l'énergie dans la valeur de production inférieure à 2,5%
- Consommation énergétique par site inférieure à 10 GWh/Site

Nous sommes maintenant en mesure d'analyser les structures de toutes ces industries pour proposer, d'une part, une méthodologie de modélisation spécifique à chaque IGCE, d'autre part, une représentation générique du système énergétique de référence pour l'industrie diffuse.

❖ *Un choix de modélisation adapté*

Une modélisation prospective pertinente s'appuie non seulement sur une représentation la plus fidèle possible du secteur étudié, mais surtout sur la disponibilité des données relative à cette représentation. Il sera donc question tout au long de la recherche de méthodes de représentations adaptées au secteur et aux questions auxquelles on souhaite répondre. Il s'agira d'effectuer des compromis en fonction de la disponibilité des données. Par ailleurs, les modèles bottum-up des secteurs industriels IGCE et ID sont communément modélisés par deux approches différentes. Pour les IGCE, les modèles sont construits par procédés car les sorties sont homogènes et exprimées dans la même unité, alors que pour l'ID ils le sont par usages dus à l'hétérogénéité des produits et procédés.

➢ Cas des IGCE

De par leur place dans la production des produits manufacturés, et vu la part des consommations du secteur, les IGCE mobilisent de nombreux acteurs dans l'élaboration de divers scénarios leur permettant une réduction de leur impact environnemental. La structure même de ces entités imposantes permet de les représenter d'une façon suffisamment détaillée qui permet d'envisager de faire des choix aussi bien sur les énergies utilisées tout au long des procédés que sur les technologies elles-mêmes au sein du processus complet de fabrication.

L'industrie IGCE sera donc structurée à partir de deux critères qui permettront d'envisager une représentation commune à toutes les industries IGCE que nous voudrons aborder. Il s'agit, d'une part, des consommations énergétiques par type de combustibles, et d'autre part, des usages énergétiques directs ou indirects au niveau des procédés de fabrication qui présenteront des disparités selon le sous-secteur d'activité.

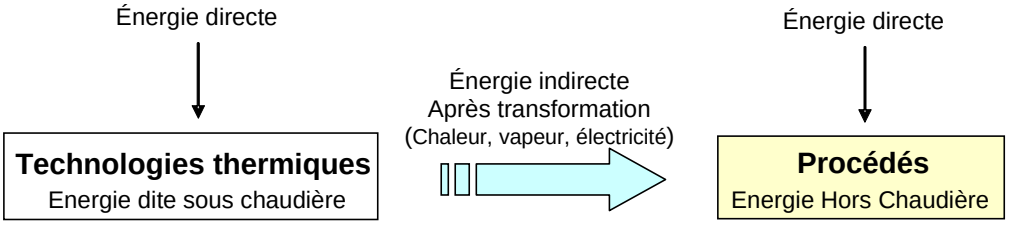
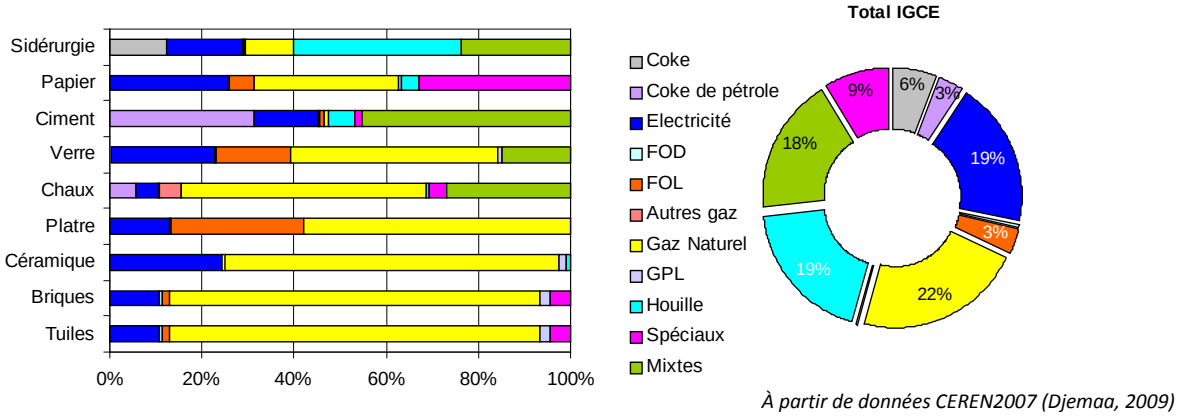


Figure 18 : Représentation schématique des consommations énergétiques dans l'industrie

Nous voyons apparaitre les deux types de transformation d'énergie présentes dans tout système industriel. Cette représentation assurera l'interchangeabilité des procédés et technologies thermiques au sein de la représentation de l'industrie. Elle permet ainsi au programme linéaire d'optimisation généré par notre générateur TIMES de pouvoir effectuer des choix assurant un chemin optimal répondant aux différentes contraintes définies dans le problème. Nous pourrons ainsi obtenir des chemins utilisant des technologies et des vecteurs énergétiques différents.

La répartition des combustibles dans le secteur IGCE de la figure ci-dessous montre toute la diversité de ces secteurs en termes de mix énergétique. Les modèles développés dans cette thèse permettent aux décideurs de quantifier les gains potentiels pour des scénarios préalablement établis.



À partir de données CEREN2007 (Djemaa, 2009)

Figure 19 : Consommations par combustible du secteur IGCE (Djemaa, 2009)

La chaleur produite sous chaudière et hors chaudière peut aussi être transformée avant d'être utilisée dans les procédés terminaux. C'est le cas de la cogénération et de la production directe d'électricité. Ces deux transformations intermédiaires doivent aussi être modélisées dans l'architecture globale de notre système industriel. La figure ci-dessous montre comment peut s'effectuer cette répartition des besoins thermiques au sein d'un système de production industriel.

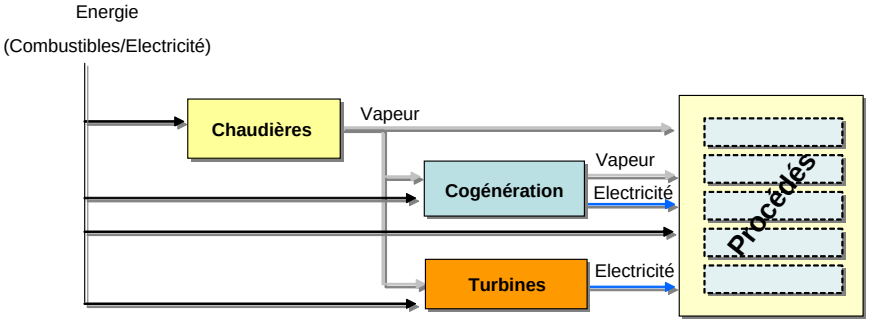


Figure 20 : Représentation de la répartition thermique possible (Djemaa, 2009)

Pilier de nos modèles de prospective, le système énergétique de référence générique servant de base à l'établissement de tous les modèles de l'industrie IGCE a été établi. Il permet de répondre à tous les secteurs de l'IGCE pour chaque pays et pour tout horizon de modélisation. Cette architecture ne représente que des opérations similaires entre les secteurs. Dans chaque branche et dans chaque boite, les caractéristiques techniques et économiques sont spécifiques au secteur et au pays considéré. Le modèle basé sur cette architecture contient explicitement le raffinement nécessaire à la modélisation détaillée du secteur considéré.
Ce type de représentation permet d'obtenir des résultats très riches, dépendants de la base de technologies présente dans le modèle. Il est évident qu'une base pauvre et peu renseignée ne permettra pas d'utiliser cet outil à sa juste mesure.

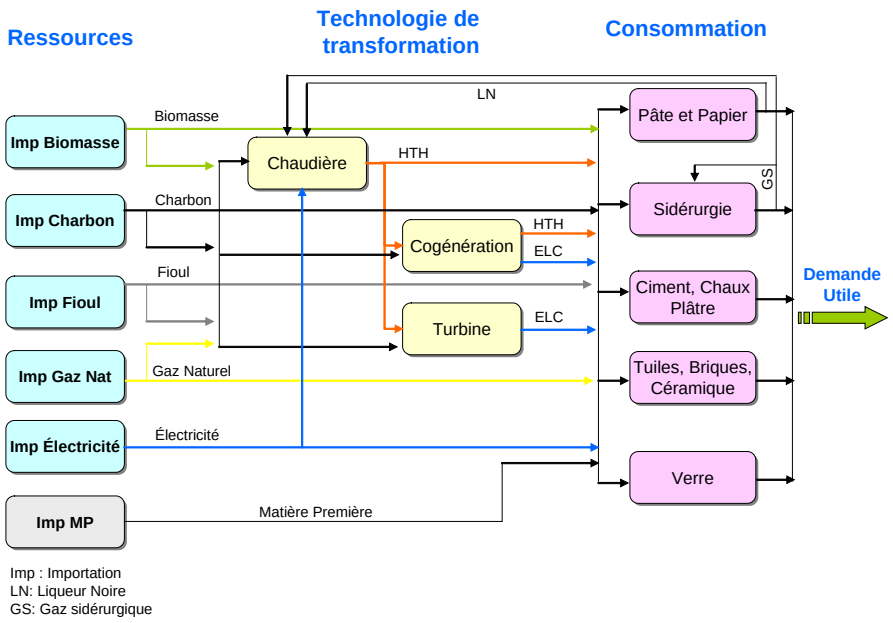


Figure 21 : Architecture du modèle industrie IGCE (Djemaa, 2009)

L'architecture établie, nous pouvons nous concentrer sur chacun des secteurs de l'IGCE afin de maitriser le processus dans son ensemble et surtout dans le détail. Il faut en effet, désagréger le système productif jusqu'aux éléments unitaires compatibles avec les données disponibles ainsi que les futures technologies disponibles qui doivent être présentes dans la base de données du modèle pour qu'il puisse faire évoluer sa structure. Une désagrégation trop fine ne permettrait pas de renseigner toutes les données nécessaires au modèle. De plus, les analyses que l'on pourrait effectuer avec un modèle trop détaillé ne seraient pas pertinentes dans le cadre d'une étude prospective de long terme. Il faut se focaliser sur les éléments qui ont du sens dans l'amélioration de la performance de l'outil industriel tant environnementale qu'économique.

La pertinence des résultats de prospective long terme de ce type d'industrie est très fortement lié à la qualité et au raffinement de la base de données des technologies disponibles et qui seront utilisables sur l'horizon de l'étude. Les (BAT ou BREF[15]) sont riches en technologies pour chacun des secteurs étudié et permettent d'envisager des études de sensibilité en fonction de l'objectif que l'on s'est fixé.

[15] BAT : Best Available Technologies, ou MTD (Meilleure Technologies Disponibles), sont disponibles au sein des BREF, documents de références issus de la directive IED (Directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles).

Pour chacun des secteurs modélisés, nous avons intégré, dans les bases de nos modèles, les meilleures technologies disponibles avec leurs caractéristiques technico-économiques en trois niveaux :

- les technologies conventionnelles,
- les technologies dites MDE (bénéficiant d'améliorations allant dans le sens de l'efficacité énergétique)
- Les technologies innovantes (ou de rupture) permettant de réaliser les mêmes tâches que les technologies actuelles mais avec des caractéristiques technico-économiques très différentes.

Le modèle pourra ainsi les utiliser à la période où elles seront disponibles afin de réaliser l'optimisation de son coût total actualisé dans le but de satisfaire les prévisions de demandes exogènes sur l'horizon de travail.

La façon d'aborder la modélisation est déterminante pour rendre les résultats interprétables.
D'une part, il faut bien maitriser le secteur pour être en mesure de valider le comportement du modèle.
D'autre part, la durée de vie de certains composants de l'industrie lourde doit être modélisée avec soin car certains ne se remplacent pas mais peuvent subir plusieurs réhabilitations pendant la durée de vie de l'outil de production.
Cette spécificité (qui peut s'apparenter à un remplacement partiel de l'équipement) a été intégrée dans les modèles concernés par une dynamique particulière de la capacité résiduelle. En effet, le calcul économique se faisant sur un horizon de temps fini, les décisions d'investissements qui n'ont pas encore été amorties en fin d'horizon doivent avoir une valeur résiduelle qui sera prise en considération dans le calcul du coût global actualisé du système. Une des difficultés dans le cadre de ces industries lourdes est d'obtenir l'état du système de production à l'initialisation du modèle (année de départ de l'optimisation) afin de bien évaluer les capacités résiduelles des équipements présents, et ce, pour chaque site du pays étudié. Un raffinement dans la modélisation de cette capacité résiduelle permettant de relater les réhabilitations intermédiaires des outils concernés a été proposé. L'absence de données complètes pour certains pays européens nous a conduit à faire des hypothèses de regroupement géographiques qui permettent d'atténuer l'effet du manque d'information sur l'état des équipements en début d'horizon.

D'autres raffinements ont également été nécessaires pour rendre compte de la complexité de certains secteurs. Ainsi, pour la France, les caractéristiques des chaudières comme son type (à tubes d'eau, à tubes de fumée, électrique…) et le type d'énergie utilisé (Houille, GPL[16], Gaz Naturel, FOL[17], …) ont pu être prises en considération. De plus, les pertes chaudières ont été ajoutées pour chacune d'entre elles. Ce raffinement est important car les pertes de chaufferie et de distribution représentent environ 15% de la consommation sous chaudière pour l'ensemble de l'industrie.

Enfin, les co-produits générés par certains secteurs ont dû être considérés afin de retracer avec fidélité les consommations d'énergie au sein du site et prendre en compte une possible valorisation avec un autre secteur industriel. Le cas de la sidérurgie est un bon exemple car nous avons dû modéliser les flux de gaz sidérurgiques utilisés entre les différents ateliers d'un site mais aussi la possibilité d'utiliser le laitier issu des haut-fourneaux dans l'industrie du ciment. Ce raffinement a été possible par l'intégration de technologies fictives, permettant la transformation d'une commodité en une autre intermédiaire pouvant être utilisée en entrée du même composant.

Afin d'illustrer cette description des spécificités de la modélisation des IGCE par procédés, voici, ci-dessous, le système énergétique de référence désagrégé du secteur de l'acier.

[16] Gaz de Pétrole Liquéfié
[17] FOL : Fioul Lourd

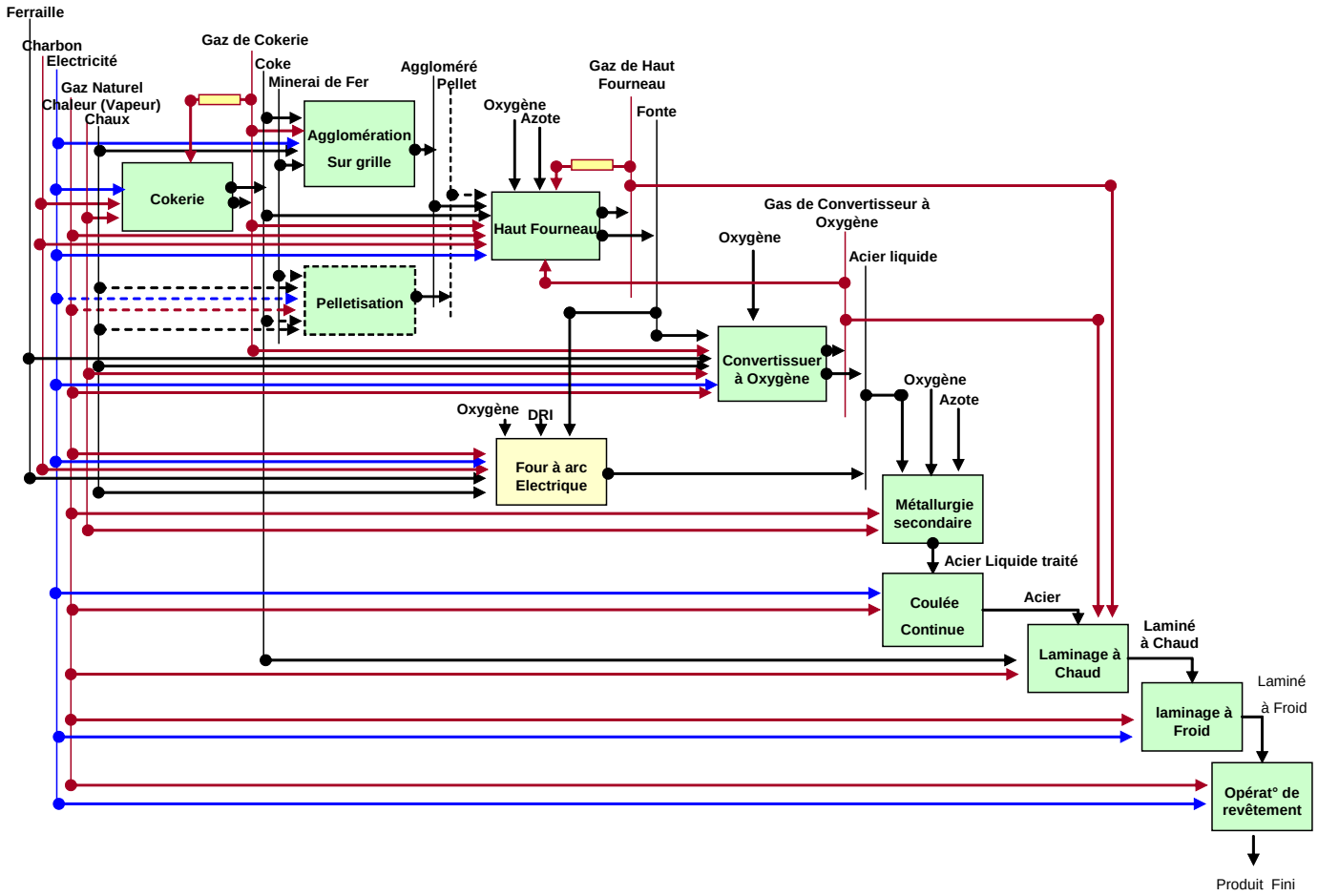


Figure 22 : Système énergétique de référence du secteur de l'acier (Djemaa, 2009)

Le travail de modélisation a donc été réalisé pour les sept secteurs IGCE mentionnés précédemment avec un raffinement particulier pour l'industrie papetière et la sidérurgie qui ont été étudiés pour la France et pour l'Europe. Les autres secteurs étant moins complexes, certaines agrégations au niveau des ateliers de production ont pu être réalisées.

L'avancée de ces travaux sur les IGCE a aidé à la détermination du cadre de travail entrepris dans la continuité de ces recherches avec EDF afin de pouvoir répondre à l'impact de tout le secteur industriel sur le système productif. La thèse de Gondia Seck a débuté alors que celle d'Ahcène Djemaa était en cours et avait déjà produit quelques modèles du secteur. La méthodologie permettant d'aboutir à la modélisation de l'industrie diffuse a été très différente comme nous le présentons maintenant.

- Cas de l'Industrie Diffuse (ID)

L'industrie diffuse possède des caractéristiques très différentes de celles des IGCE impliquant un travail de recherche complémentaire. Nous avons déjà abordé la question de la segmentation du secteur et pouvons maintenant nous concentrer sur la façon de représenter les usages consommateurs d'énergie qui devront impérativement être modélisés. L'hétérogénéité des sous-secteurs ne permettant pas une unité commune, une partie devra être consacrée à l'expression de la demande en produits finis.

Afin de mieux apprécier la diversité des opérations et des produits dans l'ensemble de l'industrie diffuse, voici, ci-dessous, deux synoptiques de deux secteurs de l'industrie diffuse.

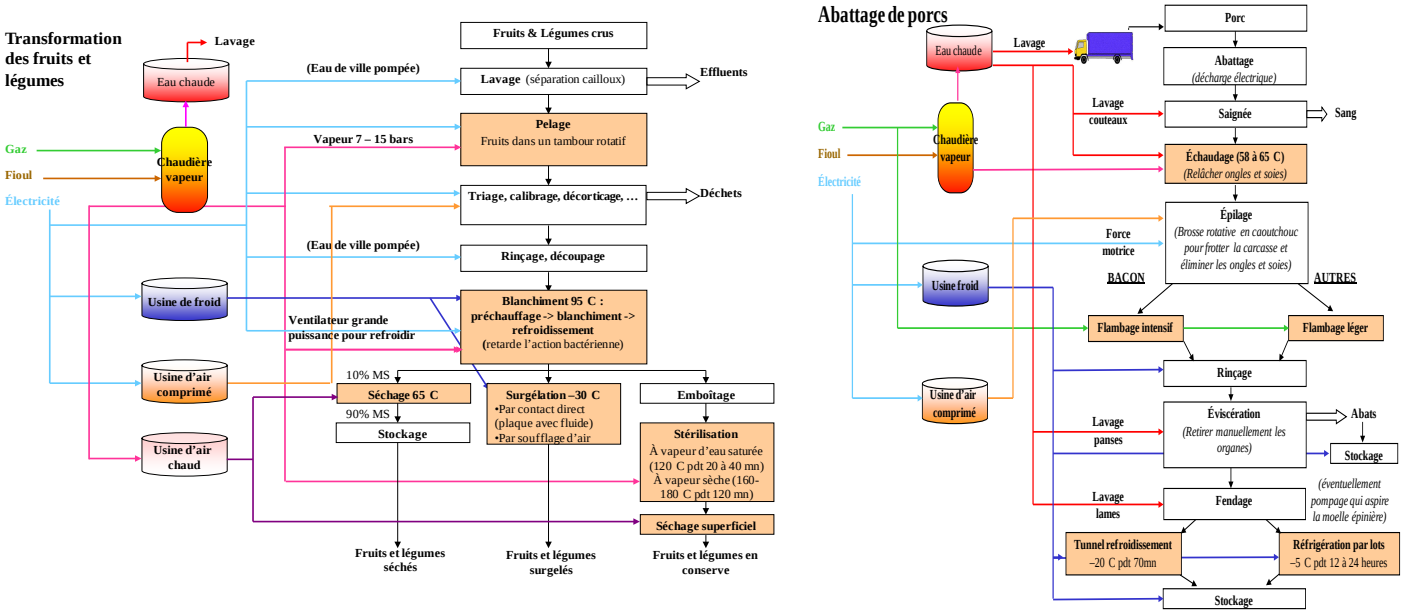


Figure 23 : Synoptiques de deux secteurs de l'ID (NACE 1533 et NACE 1511) (Seck, 2012)

Cette myriade d'opérations montre bien l'impossibilité de traiter le secteur par procédés. Le choix d'une représentation par usage s'impose assez naturellement. Il faut maintenant veiller à proposer le nombre le plus pertinent de catégories d'usages à même d'englober tous les procédés des secteurs de l'industrie diffuse.
L'avantage majeur de cette classification par usages est qu'elle peut être associée à des technologies types de production d'énergie, d'économies d'énergies ou à des consommations types par unité de produit sortant ou bien même par unité monétaire de produit sortant.
Cette représentation permet d'aboutir à un système énergétique de référence générique pour tous les sous-secteurs de l'industrie diffuse. Cette généricité est indispensable dans ce domaine car il est illusoire de penser pouvoir étudier dans le détail tous les procédés, qui par ailleurs, n'ont pas forcement de liens physiques entre eux dû à la multitude de produits qu'ils représentent. Cette méthode réduit drastiquement le temps de construction du secteur voulu.

Le choix s'est donc porté sur un vecteur de onze catégories d'usages à partir de l'analyse des différentes opérations existantes et des données du CEREN[18] pour toute l'industrie diffuse :

- **Séchage**
- **Évaporation-concentration**
- **Chauffage des liquides/gaz**
- **Traitement thermique**
- **Production de froid**
- **Opérations mécaniques**
- **Chauffage des locaux**
- **Réactions chimiques**
- **Fusion**
- **Éclairage**
- **Autres opérations**

[18] CEREN : Centre d'Études et de Recherche Économiques sur l'éNergie

À chacun des secteurs que l'on souhaitera représenter, sera associé un ensemble de ces onze usages nécessaire à la production du produit. Ceci permet de garder les ratios de consommation qui ne sont plus associés à des procédés mais à un usage particulier. Ci-dessous nous avons schématisé le RES générique pour l'industrie diffuse.

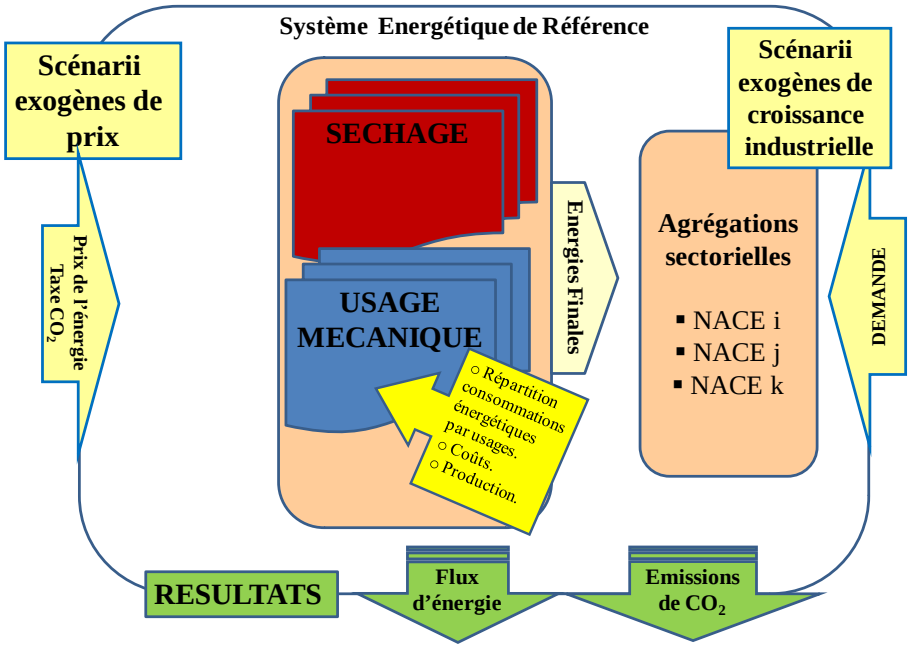


Figure 24 : Schéma simplifié du RES générique de l'industrie diffuse (Seck, 2012)

Une fois cette représentation établie, il faut faire un choix pour le niveau de désagrégation du secteur modélisé. Dans le cas de l'industrie diffuse, nous allons rencontrer une difficulté supplémentaire par rapport aux IGCE, inhérente à la quantité de sous-secteurs présents. En effet, suivant le niveau retenu, nous serons face à l'indétermination de l'influence de l'effet de structure sur les performances énergétiques déterminées par le modèle. Il est donc apparu indispensable d'étudier l'effet de structure dans l'industrie diffuse afin d'en évaluer l'impact selon le niveau de désagrégation choisi dans nos modélisations prospectives.

Voici la méthode élaborée pour son calcul ainsi que son impact dans nos analyses prospectives.

L'effet de structure bien identifié dans toute étude statistique, rend compte du paradoxe qui peut résulter de l'évolution d'une grandeur dans un sens pour les sous-populations, et dans le sens contraire sur l'ensemble de la population : cet effet s'expliquant par les variations des effectifs au sein des sous populations. Dans le cadre de l'industrie diffuse, nous serons donc confrontés à ce phénomène dès que l'on souhaitera analyser les causes d'une variation de l'efficacité énergétique au sein d'un secteur qui comporterait beaucoup de sous-secteurs.

Voici la méthode de décomposition établie afin que quantifier l'effet de structure pour être en mesure de construire des modèles de prospective permettant des analyses pertinentes de nos résultats. (Seck et al., 2016)

Considérons un secteur G subdivisé en deux sous-secteurs A et B par exemple. À l'année t, nous pouvons décomposer l'intensité énergétique I du secteur agrégé G de la manière suivante :

$$I_t = \frac{E_t}{VA_t} = \sum_{i=A,B} \frac{E_{i,t}}{VA_t} = \sum_{i=A,B} \frac{VA_{i,t}}{VA_t} * \frac{E_{i,t}}{VA_{i,t}} = S_{A,t} * I_{A,t} + S_{B,t} * I_{B,t}$$

Où E représente l'énergie consommée,
VA est la valeur ajoutée,
$I = \frac{E}{VA}$ représente l'intensité énergétique,
$S_i = \frac{VA_i}{VA}$ est la part dans la valeur ajoutée (poids économique) du sous-secteur i.

L'évolution de la performance énergétique entre deux années $\frac{\Delta I}{I_0} = \frac{I_T - I_0}{I_0}$ peut être décomposée comme suit :

$$\begin{aligned}\Delta I = I_T - I_0 &= S_{A,T} I_{A,T} + S_{B,T} I_{B,T} - S_{A,0} I_{A,0} - S_{B,0} I_{B,0} \\ &= S_{A,0}(I_{A,T} - I_{A,0}) + S_{B,0}(I_{B,T} - I_{B,0}) + (S_{A,T} - S_{A,0}) I_{A,T} + (S_{B,T} - S_{B,0}) I_{B,T}\end{aligned}$$

En regroupant les différents termes, nous obtenons la relation suivante :

$$\Delta I = \sum_{i=A,B} S_{i,0} * (I_{i,T} - I_{i,0}) \quad + \quad \sum_{i=A,B} I_{i,T} * (S_{i,T} - S_{i,0})$$

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \sum_{i=A,B} \frac{S_{i,0} * (I_{i,T} - I_{i,0})}{I_0} \quad + \quad \sum_{i=A,B} \frac{I_{i,T} * (S_{i,T} - S_{i,0})}{I_0}$$

La relation ci-dessus peut être retransformée comme suit :

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \sum_{i=A,B} \frac{E_{i,0}}{E_0} * \frac{(I_{i,T} - I_{i,0})}{I_{i,0}} \quad + \quad \sum_{i=A,B} \frac{E_{i,0}}{E_0} * \frac{I_{i,T}}{I_{i,0}} * \frac{(S_{i,T} - S_{i,0})}{S_{i,0}}$$

Nous pouvons donc généraliser pour un nombre i de sous-secteurs. La performance énergétique globale peut se décomposer de la façon suivante :

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \sum_{i} \frac{E_{i,0}}{E_0} * \frac{(I_{i,T} - I_{i,0})}{I_{i,0}} \quad + \quad \sum_{i} \frac{E_{i,0}}{E_0} * \frac{I_{i,T}}{I_{i,0}} * \frac{(S_{i,T} - S_{i,0})}{S_{i,0}}$$
$$(a) \qquad\qquad (b)$$

Nous obtenons ainsi la décomposition de la performance énergétique en deux termes :

- Le premier (a), représente l'influence des efficacités énergétiques sectorielles que l'on peut appeler *l'effet technologique*.
- Le second (b), représente l'influence de la structure économique que l'on appelle *l'effet de structure.*

Cette décomposition appliquée à l'évolution du secteur de l'industrie diffuse française de 1996 à 2005 nous a permis de mettre en évidence la part de l'effet de structure sur l'évolution de l'intensité énergétique du secteur. Elle nous a également permis d'orienter nos choix de modélisation en termes de décomposition du secteur et de détermination des drivers de demande à utiliser pour une analyse plus fine de nos résultats.

La désagrégation des secteurs étudiés sera donc le résultat d'un compromis entre le désir de bien représenter chaque industrie, la quantité de données disponibles et le temps raisonnable de construction du modèle. Nous procèderons à des regroupements reposant sur les caractéristiques des activités des unités de production tout en minimisant l'impact des effets structurels. Nous veillerons à agréger les secteurs selon le caractère des biens et des services produits, les moyens, processus et la technique de production ainsi que l'impact des effets de structures.
Cette méthodologie a permis d'établir un système énergétique de référence détaillé commun aux secteurs de l'industrie diffuse schématisé ci-dessous :

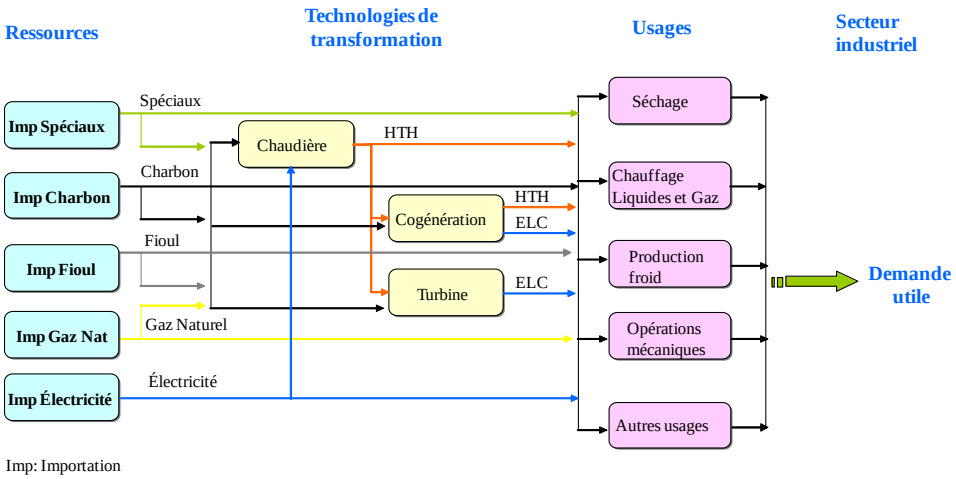


Figure 25 : Schéma du système énergétique de référence détaillé de l'industrie diffuse.

Le même détail de modélisation que pour les IGCE a été choisi pour les chaudières, turbines et cogénérations. Nous voulons en effet illustrer les potentialités de notre modèle sur un secteur en évaluant la pénétration possible des technologies de pompe à chaleur industrielles qui seront en compétition ou en relève de ces moyens de production d'énergie.

Nous avons étudié les typologies et les spécificités des modèles pour chacune des branches industrielles dont nous souhaitons analyser les impacts à travers des études de prospective. Nous présentons maintenant deux illustrations permettant de mesurer le type de questions auxquelles ces modèles peuvent répondre.

❖ *Analyse des futurs possibles*

Comme nous nous plaisons à le rappeler régulièrement, prospective n'est pas prédiction. Les résultats obtenus par nos modèles bottum-up sont loin d'être parfaits et complets. La première mise en garde concerne l'approche elle-même qui est basée sur un équilibre partiel. Nos modèles sectoriels ne sont pas liés au reste des secteurs de l'économie et, par conséquent, aucun retour de l'influence des modifications envisagées sur le reste de l'économie n'est possible. Certaines améliorations sont envisageables par l'intégration de certains élasticités prix afin d'assouplir les contraintes fortes imposées par les projections strictes de demandes utiles.
D'autres limitations concernent les indicateurs économiques utilisés qui, pour certains, doivent faire l'objet d'études paramétriques afin d'analyser leur influence, surtout pour les horizons de très long terme. Le taux d'actualisation est l'un des paramètres les plus influents pour les industries très capitalistiques, mais les disponibilités et les potentiels de certaines variables peuvent aussi être déterminants.
Nous nous attacherons, dans chacune de nos analyses, à bien spécifier toutes les hypothèses relatives à l'établissement de nos scénarios afin de proposer des résultats qui peuvent être débattus.

➢ Réponse des IGCE à la contrainte environnementale

La première illustration permet de mettre en exergue les modifications qui peuvent être envisagées dans l'industrie lourde très émettrice de CO_2 pour répondre à une contrainte de limitation des émissions de gaz à effet de serre par la voie :

- soit d'une taxe (d'une valeur constante de 50€/t à partir de 2012, scénario nommé SCA Tax)
- soit d'une limite d'émission par un facteur de réduction de 75% à l'horizon 2050 (scénario dit Facteur 4 nommé SC BNDT pour une contrainte globale et SC BND pour une contrainte individualisée par secteur).

Les réponses de l'industrie à ces deux scénarios seront comparées à un scénario tendanciel (Dit Business As Usual comparable à ceux utilisés par l'AIE nommé SC Tend), dans lequel aucune contrainte environnementale n'a été intégrée.

Tout le corpus d'hypothèses de construction des scénarios de sollicitation des modèles (prix des énergies, projection des demandes, calage de l'année de démarrage…), est présenté dans les références (Djemaa, 2009; Hita et al., 2009).

L'étude de ces deux scénarios a pu mettre en évidence, d'une part, la modification du mix énergétique utilisé dans le secteur, d'autre part, la modification de la structure technologique de production.
L'intégration d'une contrainte CO_2 montre un changement de la structure de consommation en faveur du gaz naturel et de l'électricité au détriment du charbon. Le renforcement de la contrainte (par le scénario facteur 4) se traduit par un niveau encore plus élevé pour la part de l'électricité et une baisse drastique du charbon.
Ces résultats semblent tout à fait logiques et cohérents avec le contenu carbone de ces vecteurs énergétiques (voir figure ci-dessous).

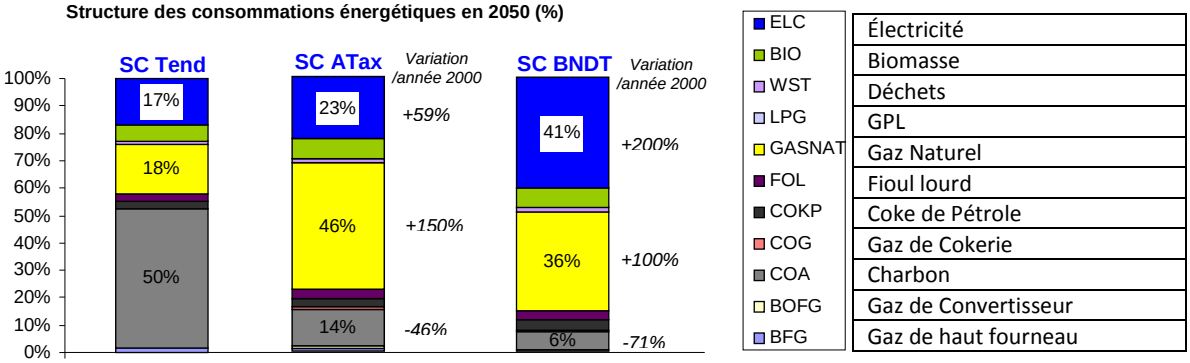


Figure 26 : Structure de la consommation de l'IGCE en France en 2050 pour les 3 scénarios

Au-delà de la quantification de ces transitions énergétiques au sein du secteur français des IGCE, nos modèles permettent de donner les chemins technologiques permettant leur réalisation. Si nous nous focalisons sur la sidérurgie, industrie IGCE la plus intense (avec 29% de réduction de sa consommation d'énergie), ce secteur joue le bon élève dans les efforts d'efficacité énergétique réalisés dans le secteur IGCE qui, dans l'ensemble, montre une baisse globale de 19% pour le scénario avec taxe et de 8% pour le scénario facteur 4.

Les figures ci-dessous montrent l'évolution du mix technologique pour les deux scénarios qui modifie profondément les chemins de production de l'acier, utilisant les technologies électriques pour satisfaire la contrainte environnementale.

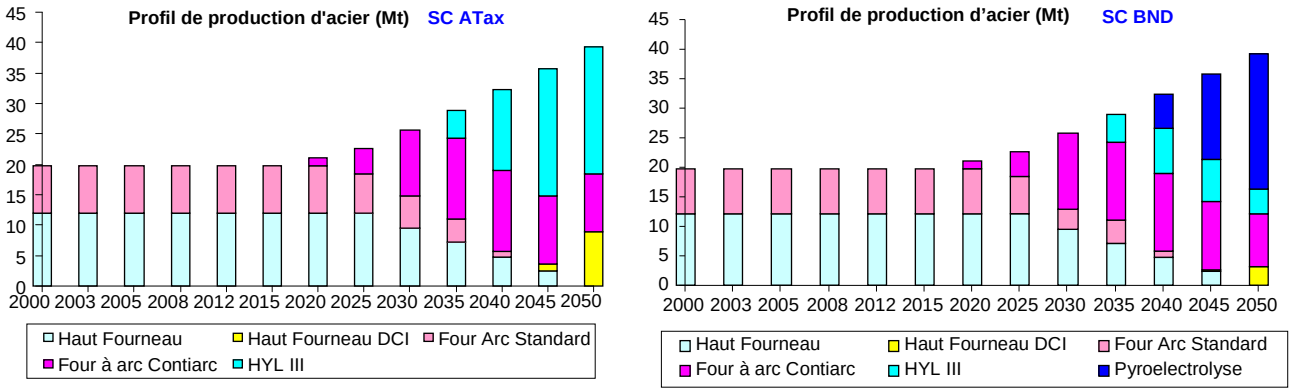


Figure 27 : Structures technologiques satisfaisants aux contraintes des scenarios étudiés

Ce type de résultat montre la puissance de cet outil d'aide à la décision pour les firmes industrielles. De plus, le fait d'utiliser un modèle d'optimisation nous permet d'aller plus loin que de simples changements de technologies. En effet, ayant accès aux coûts marginaux et réduits pour chacune des technologies, nous pouvons aller au-delà du simple résultat optimal qui ne peut prendre en considération certains aspects humains (suppressions d'emploi par exemple). L'accès à ces coûts montre au décideur les autres technologies très proches en terme technico-économiques et qui peuvent se substituer à celles du choix optimal afin de satisfaire aux contraintes supplémentaires non modélisables dans ce type d'exercice.

Ces analyses sont complétées par des études de sensibilités sur les paramètres sensibles comme le taux d'actualisation qui peut être la cause d'un changement de chemin technologique. Une variation du taux de 8 à 10% pour ce type d'industrie lourde montre, pour l'industrie du ciment par exemple, un changement technologique nouveau. Élément supplémentaire dans l'aide à la décision d'investissements, ces outils permettent l'intégration de nombreux paramètres qui ne pouvaient jusqu'ici être accessibles sans eux.

Nous venons d'illustrer brièvement les atouts de la modélisation prospective comme outil d'aide à la décision permettant l'évaluation de l'efficacité énergétique, les choix d'investissements technologiques ou l'impact environnemental d'une filière.

Voyons maintenant un autre exemple d'application de ces outils pour évaluer l'effet de la pénétration d'un type de technologie permettant un gain d'efficacité énergétique au sein de l'industrie diffuse.

- <u>Les Pompes à chaleurs : solution efficace pour une économie d'énergie dans l'industrie agroalimentaire ?</u>

Nous avons montré l'élaboration d'un système énergétique de référence à même de représenter tous les secteurs de l'industrie diffuse. Appliquons ce système à l'industrie agroalimentaire (noté IAA dans la suite), sous-secteur le plus énergivore des industries diffuses.
L'enjeu de la modélisation prospective dans ce cadre sera double. D'une part, seront envisagées quelles peuvent être les économies d'énergie réalisables lors de la pénétration des technologies de pompes à chaleur industrielles hautes températures bientôt disponibles. D'autre part, seront discutés les effets de certains outils économiques comme les certificats d'économies d'énergie.

Comme pour tout modèle de prospective, des scénarios permettant de les solliciter doivent être définis. Dans le cas de l'industrie diffuse, nous devons faire face à quelques spécificités dues à un usage des ressources énergétiques plus diversifié et à la grande variété des produits étudiés.

Là où nous pouvions nous baser sur des projections de prix des énergies primaires issues des prévisions internationales comme celles du WEO[19] ou provenant d'autres modèles de type POLES[20], dans le secteur diffus, l'approvisionnement ne se fait pas avec les mêmes drivers. Il faut donc construire des évolutions de prix des énergies spécifiques à ces contraintes. Nous avons donc décidé, de partir des tendances historiques des prix des énergies utilisées dans le secteur modélisé. Elles ont été prolongées en utilisant les projections des prix des énergies de l'AIE en leur appliquant une « élasticité » déterminée à partir des différences entre le prix du pétrole et ceux des combustibles de l'industrie. Les données de l'AGRESTE[21] entre 1993 et 2009 pour le secteur des IAA ont servi de base pour ces calculs.

Cette méthode est appliquée aux combustibles du type Fioul Domestique (FOD), Fioul Lourd (FOL) et au Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) à partir de la relation suivante :

$P_{COMB_i} = P_{Pétrole(WEO\,2010)}^{\gamma_i}$ où γ_i représente l'élasticité du combustible $i = \{FOD, FOL, GPL\}$.

Concernant la construction des scénarios d'évolution de demande, nous avons aussi déterminé les meilleurs indicateurs à même de représenter toute la diversité des produits qui constituent les sous-secteurs de l'ID. Il s'agira encore de trouver le bon compromis entre le niveau de désagrégation et la quantité de données nécessaire pour satisfaire à la représentation voulue.
Comme le montre la figure ci-dessous, peu d'indicateurs peuvent être représentatifs à un haut niveau d'agrégation.

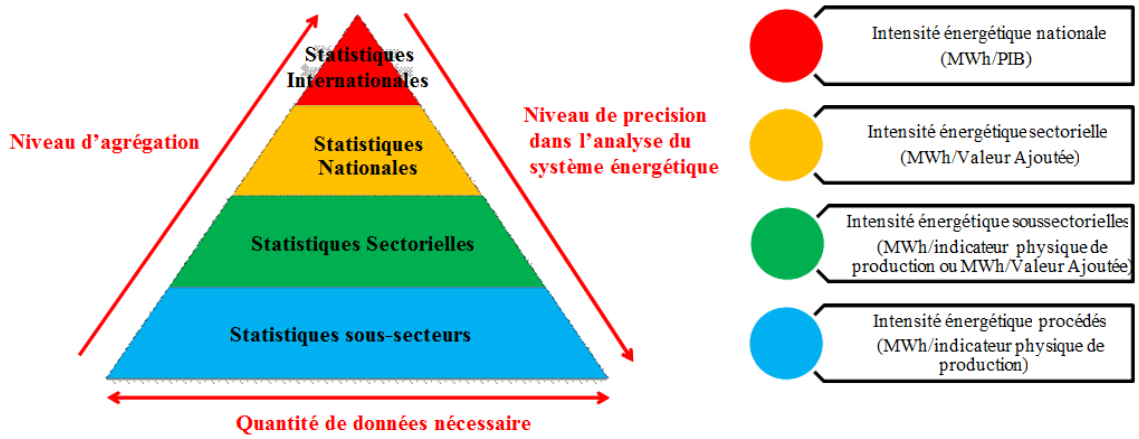


Figure 28 : Pyramide des indicateurs (Seck, 2012)

Comme l'illustre très bien l'IAA avec des produits qui peuvent s'exprimer en volume, en poids, ou par unité, il faut trouver un indicateur commun pour être en mesure de représenter la demande d'un tel secteur. Après analyse, l'Indice de Production Industrielle (IPI) est sans conteste l'indicateur qui reflète le mieux la demande industrielle. Cependant, le manque de données permettant son calcul à un niveau plus agrégé ne nous permet pas de l'employer pour nos modèles. Nous nous sommes alors penchés sur l'étude de critères plus économiques permettant d'homogénéiser l'hétérogénéité des produits comme la Valeur de Production (VP) et la Valeur Ajoutée (VA). Après étude de ces indicateurs appliqués à l'ID, nous convergeons vers l'utilisation de la valeur ajoutée comme indice de production industrielle appliqué à la modélisation avec les modèles de type TIMES qui permettent de mieux pallier le manque de données observées pour les indices de production industrielle.

[19] WEO : World Energy Outlook, publication annuelle de l'Agence Internationale de l'Energie
[20] POLES : Prospective Outlook on Long-term Energy Systems, modèle développé par le CNRS à Grenoble pouvant calculer les projections des prix des énergies au niveau mondial.
[21] AGRESTE : Statistique, évaluation et prospective agricole du ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la fôret.

Reste à définir le taux d'actualisation à appliquer dans le cadre de l'ID pour être en mesure de débuter nos études. La structure de production de l'ID pouvant évoluer plus rapidement que celle de l'industrie IGCE, l'horizon temporel de simulation sera réduit (horizon 2020 au lieu de 2050). En effet, les changements de technologies de production d'énergies intermédiaires (chaudières, pompes à chaleurs, récupérateurs sur effluents…) peuvent être entrepris plus aisément car ils ne représentent qu'une petite partie de l'outil de production. Le choix d'un taux d'actualisation se fera entre une vison plutôt étatique ou plutôt entreprise. Après étude des fondamentaux de l'établissement de ces taux, nous avons convergé sur un taux « public » à 4% et un taux « entreprise » à 10%. Ces deux taux nous permettront de mieux appréhender les pistes d'économies d'énergie dans l'ID et d'examiner les gisements d'implantation de la technologie des pompes à chaleurs selon deux points de vue (public et privé).

Deux scénarios pour un horizon 2000-2020 ont été établis :
Le scénario BaU, représentant traditionnellement la continuation des tendances actuelles.
Le scénario Sc_HP qui permet l'implémentation de technologies de pompes à chaleur (PAC) pour différents niveaux de températures. Ces PAC permettent, pour différents ateliers, de récupérer la chaleur fatale des procédés à différents niveaux comme l'air des compresseurs, la chaleur au niveau des condenseurs des productions de froid et sur tout usage thermique entre 20 et 200°C.

Ci-dessous, sont visibles les économies d'énergie finale (correspondant aux achats d'énergie) engendrées par l'implémentation des PAC entre 2001 et 2020 qui atteignent 13,6%.

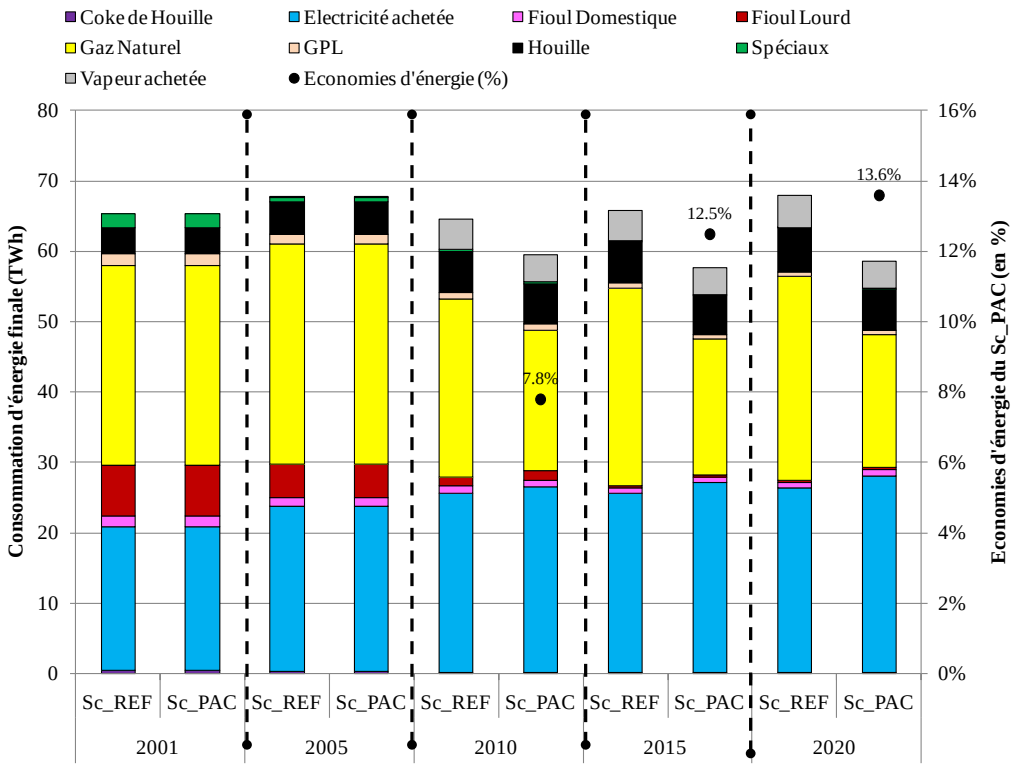


Figure 29 : Consommation d'énergie finale du secteur de l'IAA (scénario tendanciel et scénario PAC)

Au-delà de quantifier les économies d'énergie possibles par la pénétration des PAC dans le secteur des IAA, le modèle permet d'aller bien plus loin en distinguant, non seulement les potentiels de récupération selon les sous-secteurs des IAA (Figure 30), mais aussi en identifiant au sein de quels groupement d'usages (parmi les onze déterminés) les économies ont été réalisées et les potentiels restants (Figure 31).

Nous constatons que ce ne sont pas forcément les secteurs avec les plus forts potentiels d'opportunités de récupération de chaleur par PAC qui récupèrent le plus de chaleur. On voit sur la Figure 30 que l'industrie du pain et pâtisseries présente le plus faible taux de récupération par PAC avec 1,4% alors que ses opportunités de récupération sont les plus élevées des IAA avec 4,5 TWh.

Quand on regarde la chaleur récupérée par les PAC sur la part de l'ID la plus importante (10 premiers secteurs, Figure 31), on constate que la production de froid est le premier pourvoyeur d'énergie thermique fatale. En effet, le froid industriel met en œuvre des technologies avec de forts coefficients de performance qui en fait de gros producteurs de chaleur récupérables par d'autres PAC.

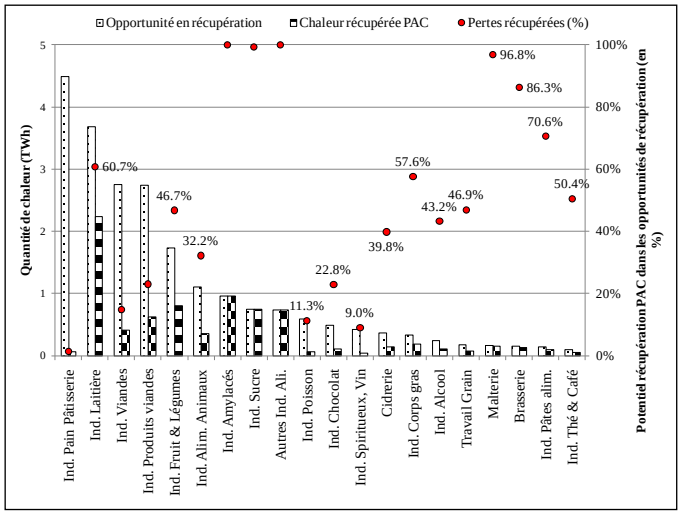


Figure 30 : Potentiels de récupération des PAC par sous-secteur de l'IAA

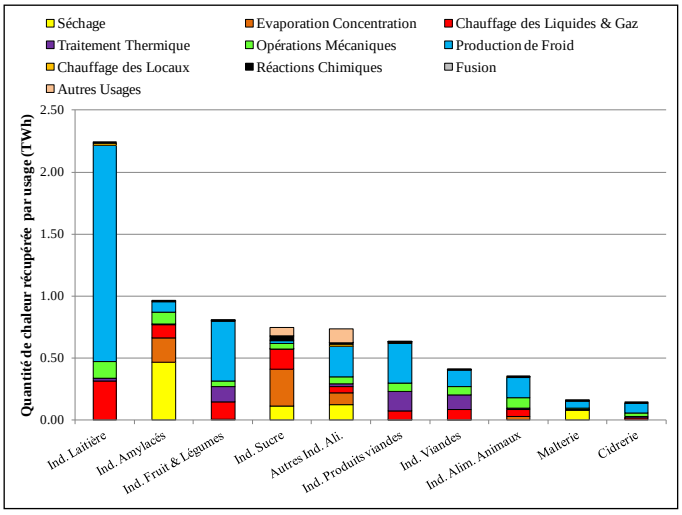


Figure 31 : Potentiel de récupération des PAC par sous-secteur de l'IAA et par type d'usage

Comme la segmentation des PAC a été réalisée en sept niveaux de températures par pas de 10°C pour les quatre premières tranches, par pas de 20°C pour les deux suivantes et un pas de 60°C pour la dernière tranche. Nous pouvons aussi accéder à la répartition de la pénétration des PAC par niveau de température (Figure 32).

Ce raffinement au sein de notre modélisation permet d'entrevoir tout le potentiel de développement par maturité de technologie et va permettre d'étudier à partir de quels niveaux économiques les dernières générations de PAC hautes températures (de 100°C à 200°C soit les 3 dernières tranches) parviennent à pénétrer le secteur. En effet, les technologies employées dans ces trois derniers secteurs ne sont pas compétitives dans les hypothèses technico-économiques prises pour notre scénario jusqu'en 2020 alors qu'il existe un fort potentiel pour ces technologies (Figure 33)

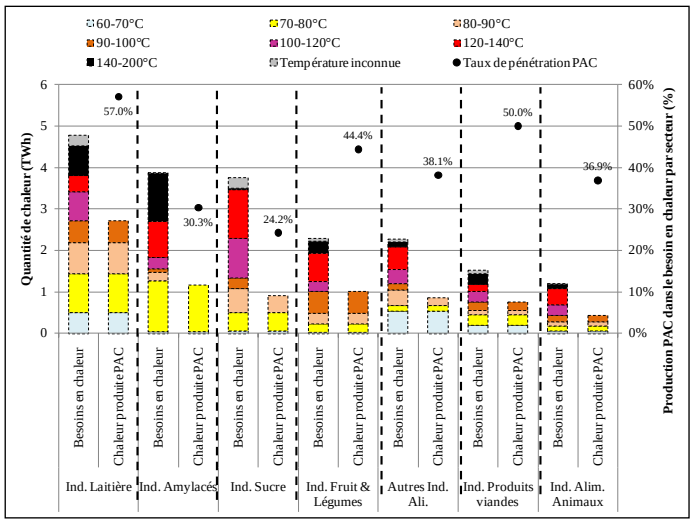


Figure 32 : Potentiel économique de substitution des PAC dans les 7 premiers sous-secteurs de l'IAA en 2020

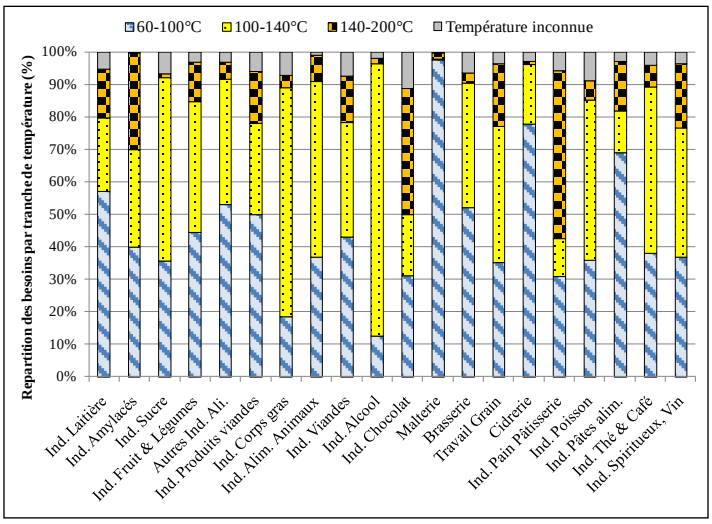


Figure 33 : Répartition des besoins par tranches de température et par sous-secteur dans l'IAA

Enfin, l'outil de prospective permet aussi d'identifier les niveaux de subvention qu'il faudrait établir afin de rendre une technologie compétitive dans un but de déploiement de technologies très efficaces énergétiquement comme les PAC à hautes températures.
Nous avons ainsi regardé comment notre modèle pouvait donner des éléments de réponse pour identifier les taux de subvention que les obligés du mécanisme de certificats d'économies d'énergie (certificats blancs) pouvaient octroyer afin de récupérer les certificats engendrés par les gains relatifs aux économies réalisées par l'installation de ces PAC hautes températures.

Ce type d'étude (Seck et al., 2015) que vous trouverez en annexe, doit bien entendu intégrer toutes les recommandations d'usages en termes de sensibilité vis-à-vis des variables de notre modèle. Dans notre cas d'étude, les variations des prix du gaz naturel, du taux de taxe sur le CO_2 ou bien du contenu carbone du kilowattheure électrique, changent le taux de subvention permettant d'aboutir au déploiement de la technologie. De plus, la promotion des PAC dans l'industrie des IAA est très adaptée au cas de la France, mais totalement proscrite dans un pays où l'électricité n'est pas décarbonée.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Après avoir brièvement rappelé comment réaliser des exercices de prospective de système énergétiques, nous avons exposé l'approche retenue au CMA. La construction de modèle Bottum-up à partir du générateur de modèle TIMES permet la représentation de nombreux systèmes énergétiques. Cependant, suivant le niveau détails que l'on veut obtenir, il est nécessaire d'approfondir et d'explorer des représentations différentes permettant une meilleure analyse des résultats obtenus.

J'ai pu participer à l'exploration de voies de progrès dans deux domaines en particulier. La représentation des systèmes d'énergies renouvelables ainsi que celle du système de production industrielle. Deux problématiques très différentes qui ont contribué à rendre nos modèles plus précis.

J'ai illustré ces améliorations par quelques résultats permettant d'apprécier toute la diversité d'analyse qui peut être menée pour une meilleure approche d'un futur rempli d'incertitudes et parfois fait de choix Cornéliens.

Suite aux recherches menées sur le secteur industriel, nous sommes maintenant en mesure de représenter tout type de secteurs avec une grande finesse et de donner les recommandations relatives aux données nécessaires à leur établissement.

Concernant l'intégration des énergies renouvelables au sein de nos modèles, les recherches se poursuivent au CMA car leur représentation nécessite encore des progrès dû à leur aspect intermittent et leur contribution à l'équilibre du réseau électrique qui doit encore être raffiné.

J'ai donc pu contribuer à l'émergence et au développement de cette thématique au CMA : d'une part, par l'établissement des relations avec les entités internationales de l'ETSAP et les laboratoires de recherches développant cette activité ayant permis l'avènement de la première thèse au CMA dans le domaine. D'autre part, par l'encadrement de deux thèses et plus de quarante communications et publications.

Je contribue à la réalisation d'autres études liées à la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable mais ne suis pas actuellement leader d'un projet de recherche sur la thématique. Mon implication dans les futurs projets de prospective se feront par le biais du secteur du résidentiel/tertiaire que je compte aborder une fois que mes recherches sur les algorithmes de contrôle dans ce secteur auront abouti à des résultats représentables dans le paradigme de la modélisation prospective long terme.

DÉVELOPPEMENTS ALGORITHMIQUES POUR L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

INTRODUCTION

Parallèlement aux activités de recherche dans le domaine de la prospective énergétique entreprise depuis mon affectation au CMA, je développe une activité de recherche relative à la meilleure représentation et gestion des systèmes énergétiques dans le secteur résidentiel et tertiaire depuis 2010. Cette thématique embrasse : d'une part, la représentation du comportement du bâtiment pour améliorer son contrôle à partir des données issues des capteurs in situ, d'autre part, l'intégration de l'effet de ses usagers afin de proposer des actions visant à réduire la consommation du parc existant.

Après avoir rappelé la façon dont j'ai été amené à approfondir ce domaine et posé le contexte de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment, je présenterai l'évolution de notre approche avec la diffusion des moyens de mesure qui permettent d'approfondir le domaine du recueil et du traitement des données pour une meilleure efficacité.

GENÈSE

Lors de ma dernière année de thèse, j'ai pu commencer à m'immerger dans le monde de la recherche par le biais d'un accord cadre passé entre le Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris et la Direction de la Recherche de Gaz de France. Le but de cette collaboration était de proposer des voies d'amélioration pour différents systèmes énergétiques consommant du gaz naturel. J'ai ainsi pu me confronter à la problématique de l'optimisation des systèmes énergétiques du point de vue de l'énergéticien (Delenne et al., 2001, 1998). Il s'agissait en effet, à partir de la modélisation des systèmes, de proposer des améliorations des performances par un meilleur contrôle. Cette activité s'est poursuivie par le montage d'un projet européen concernant l'optimisation des effets d'inertie avec une approche basée sur la logique floue (OPTINER[22]). Ce projet fut l'occasion de mettre en pratique (par le biais d'expérimentations), l'implémentation d'algorithmes de contrôle du chauffage et du rafraichissement à base de stockage de glace (Guerassimoff and Fulcheri, 2000a, 2000b). Ce fut une expérience très enrichissante qui révéla mon intérêt pour le secteur du bâtiment. En fin de projet, je me suis consacré au montage du Mastère Spécialisé en Optimisation des Systèmes Énergétiques (MS OSE) qui ne me permit pas de poursuivre cette thématique de recherche dans la continuité du projet Optiner.

Dix ans plus tard, par le biais de ma recherche de partenariat pour le MS OSE, j'ai eu l'occasion de renouer avec le secteur du bâtiment. La problématique du contrôle était toujours présente, avec de nouveaux défis liés, d'une part, au déploiement de capteurs de mesure qui faisaient cruellement défaut lors de mes premières investigations. D'autre part, à la prise de conscience progressive du rôle de l'occupant dans l'usage qui est fait du bâtiment. J'ai donc pu lancer une thématique liée à l'exploitation des données (notamment issues de ces capteurs) et à l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les bâtiments.

Je présente dans cette partie les divers travaux que j'ai pu effectuer ou encadrer dans ce domaine.

[22] OPTINER : Fuzzy OPtimizer of INERtial Effects, projet Européen JOULE III – 1998-2000

L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LES BÂTIMENTS

❖ *État des Lieux*

Le secteur résidentiel et tertiaire est au cœur des préoccupations environnementales depuis des décennies. Renforcement des directives (DIRECTIVE 2010/31/EU, 2010; DIRECTIVE 2012/27/EU, 2012), réglementations thermiques (RT 2012, 2012), intégration possible de l'analyse du cycle de vie dans la réglementation, diagnostic avec présentations d'étiquettes énergie et carbone, contrats de performances énergétiques et subventions en tout genre sont là pour œuvrer à la réduction de l'impact du secteur sur la consommation énergétique et ses conséquences sur le climat.
En 2014, en France le secteur représente plus de 58 % de la consommation d'énergie finale (plus de 38% pour l'Europe des 28), et la prochaine réglementation thermique (RT2020) prévoit que les nouveaux bâtiments ne soient plus des consommateurs mais des producteurs d'énergie (BEPOS[23]). De nombreux projets ANR[24] et les programmes PREBAT[25] ou PACTE[26] ont été mis en œuvre pour soutenir la filière et faire le lien entre bâtiment, smart-grid et ville durable. Nous voyons bien tous les efforts réalisés et prévus pour que le nouveau parc de bâtiment ne soit plus un fardeau mais un atout dans notre système énergétique global. Ceci n'est pas le cas de tous les autres secteurs condamnés à réduire leur impact environnemental sans pour autant parvenir à une telle inversion de la tendance.

Le tableau semble donc très idyllique si l'on omet d'une part, le parc existant qui est loin de correspondre aux standards actuels et représente un effort considérable pour être réhabilité.
D'autre part, la présence inéluctable d'occupants dans les bâtiments qui viennent « parfois » mettre à mal les performances annoncées par les certifications les plus prestigieuses en termes de performance énergétique.
La Commission Européenne a proposé le 30 novembre 2016 une mise à jour de la directive relative à la performance énergétique des bâtiments. Elle met justement l'accent sur la promotion des nouvelles technologies, la rationalisation des règles existantes et la mise à jour de la base de données des bâtiments existants.

De nombreux programmes et actions au niveau Européen et National sont mis en œuvre (Odysee, 2015). Cependant, au-delà des aspects structurels abordés par tous les angles possibles (bâti, équipements, intégration…), l'usager est souvent pris en considération à travers les usages classiques qu'il entretien avec son environnement. L'étude du comportement même des occupants émerge depuis quelques années, et d'autres disciplines comme la sociologie ou la psychologie (jusque-là absentes des débats) deviennent indispensables dans l'établissement des déterminants qui permettront à terme, d'obtenir réellement les performances correspondant aux nouvelles normes imposées.

Il y a sept ans, nous étions dans l'expectative concernant les directives qui ont vu le jour depuis, comme je viens de le rappeler brièvement. J'avais entrepris des recherches visant à comprendre comment nous pouvions, dans le secteur résidentiel, aider les ménages à prendre conscience de leur façon de consommer afin de les aider à être plus performants énergétiquement parlant. J'ai donc débuté par la participation au montage du projet GridTeams dont je vais maintenant présenter les grandes lignes.

[23] BEPOS : Bâtiment à Energie POSitive
[24] ANR : Agence Nationale de la Recherche : http://www.agence-nationale-recherche.fr/
[25] PREBAT : Programme de Recherche sur l'Energie dans les BATiments : http://prebat.net/
[26] PACTE : Programme d'Action pour la qualité de la Construction et la Transition Énergétique http://www.programmepacte.fr/

❖ *Mesurer pour mieux agir*

Le déploiement complet des compteurs communicants à horizon 2020 va permettre une gestion totalement différente du parc de bâtiment, faisant de ces objets des acteurs directs du réseau énergétique futur. En effet, un bâtiment comporte de nombreux équipements pouvant être pilotés et possède une inertie qui peut aussi être mise à profit dans le contrôle des moyens de chauffage et de climatisation. Toutes ces potentialités ne pourront être utilisées que si la mesure et le comptage de l'énergie mise en jeux par leur usage est accessible. Dans l'industrie ou le tertiaire, ces données sont en partie exploitables mais très souvent les systèmes de Gestion Technique du Bâtiment (GTB) ne sont pas exploités à la hauteur de leur potentiel, voire pas utilisés du tout (Club CA2D, 2011). Pour ce qui est du secteur du résidentiel, tout reste à faire avec le déploiement des compteurs communicants Linky.

Pour proposer des solutions efficaces, il faut pouvoir les expérimenter auparavant. Dans ce but, le projet Gridteams visait à tester la mise à disposition aux utilisateurs résidentiels de leur courbe de charge et de les aider dans le décryptage de ce qu'ils pourraient être en mesure de faire pour réduire leurs consommations.
Ce projet a réuni les acteurs industriels suivants :

- Gridpocket[27] pilote du projet et spécialisé dans la création applications notamment pour le web et appareils mobiles,
- Planète Oui[28], commercialisateur d'énergie verte et intéressé par les actions d'efficacité énergétique possibles à l'issue du projet.
- WIT[29] : constructeur de GTB intégrant dans ces produits une dimension énergétique par leur concept de GTEB[30]. Ils ont construit et installé sur site les compteurs communicants nécessaires à l'expérimentation.

Les deux centres de recherche suivants :

- Mines ParisTech par le biais du CMA pour la partie analyse et traitement de l'information recueillie.
- Telecom ParisTech, par le biais de son centre de Sociologie pour évaluer les impacts des outils mis à disposition.

Un territoire, lieu de l'expérimentation :

- La ville de Cannes, qui a été motrice dans le recrutement du panel et a permis la mise en place des récompenses testées dans ce projet.

Le projet, décrit sur le site internet SmartGrids-CRE[31], avait pour objet le test de mesures incitatives pilotées par l'analyse des consommations d'un panel de Trente foyers, d'un point de vue à la fois énergétique et sociologique.

Ma contribution au projet a été, à partir d'enquêtes et de visites sur site, de proposer des algorithmes permettant d'établir un modèle du logement afin de définir des bornes de consommation et ainsi proposer des comparaisons entre foyers pour inciter les ménages à faire des économies d'énergie.

Pour réaliser ces modèles, j'ai proposé une approche à plusieurs niveaux :

[27] http://www.gridpocket.com/
[28] https://www.planete-oui.fr/
[29] http://www.wit.fr/
[30] GTEB : Gestion Technique et Énergétique du Bâtiment
[31] Site dédié aux smart-grids de la Commission de Régulation de l'Énergie
http://www.smartgrids-cre.fr/media/documents/monde/fiche_projet_GridTeams.pdf

Le première concerne l'évaluation des besoins du bâti à partir de simulations réalisées sous Comfie/Pléiades© qui donna les bornes en fonction des spécificités des logements afin de normer la consommation pour ne pas pénaliser les foyers hébergés dans des bâtiments moins performants.
Le deuxième a consisté à définir un niveau d'équipement des ménages et de le représenter sous forme de consommations engendrées et économies réalisables.
Enfin, le troisième niveau a consisté à évaluer la part d'énergie économisable selon le comportement des ménages afin de définir des bornes qui puissent être accessibles et personnalisées.

Ces modèles réalisés, à l'aide des données issues de l'expérimentation, l'équipe de sociologues a pu mesurer les effets des actions qui ont été proposées tout au long de cette expérimentation.
Voici ci-dessous, le principe du projet dont vous trouverez de plus amples détails dans l'article publié dans la revue Energy & Buildings (Guerassimoff and Thomas, 2015) en annexe.

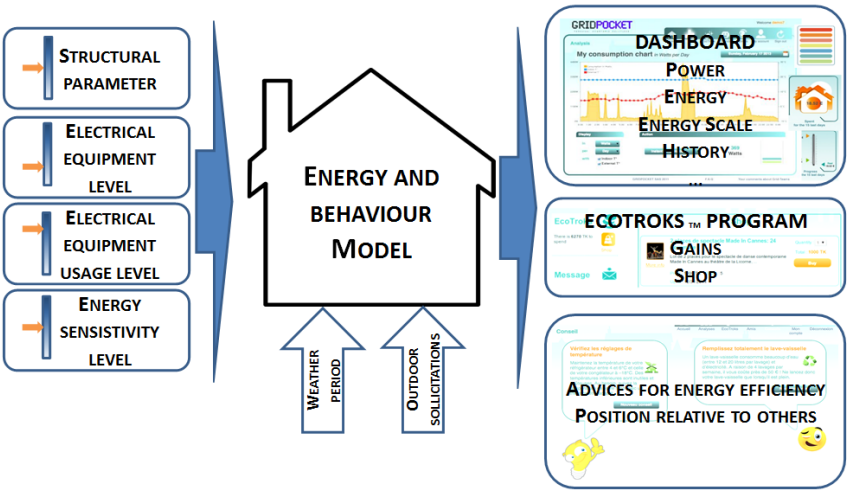


Figure 34 : Principe du développement des outils pour le projet GridTeams

Ce projet a reçu le prix de la croissance verte numérique en 2012 et a permis de mieux appréhender les leviers permettant d'agir durablement sur le comportement des ménages afin qu'ils puissent faire des économies d'énergie. Il a aussi permis de mettre en évidence l'importance des données nécessaires à la réalisation du modèle simplifié du logement et pour l'établissement du questionnaire comportemental des ménages.

- *Traitement des questionnaires et données des projets*

Au cours de ce projet, j'ai justement répondu à une sollicitation de la part de la start-up E3D Environnement qui voulait mettre en place un dispositif d'accompagnement des ménages dans leur gestion des déchets. Afin d'être en mesure de proposer cet outil, ils devaient traiter à terme de grandes quantités de données issues de questionnaires. Ce projet faisant écho au projet GridTeams dans l'objectif, mais dans un domaine environnemental. Il m'a semblé pertinent de répondre à leur demande et de mettre en œuvre des techniques de datamining pour rationaliser les données traitées et proposer des algorithmes qui permettent de conseiller les usagers sur les gestes à effectuer en vue de réduire leur volume de déchets.

Ces algorithmes d'aide à la décision ont été élaborés à partir de l'apprentissage effectué sur le traitement des données récoltées. À l'issue du projet, la plateforme GD6D[32] était opérationnelle. À ce jour elle est toujours active et donne des résultats très prometteurs. L'entreprise a depuis continué son développement avec des applications étendues par rapport aux problématiques des déchets et

[32] GD6D : https://www.gd6d.eu/

annonce de réelles améliorations dans les sujets abordés (prise de conscience environnementale ayant un impact mesurable sur la production de déchets).

Nous avons donc regardé les techniques d'analyse multicritère adaptées au traitement de l'information dans le domaine de l'environnement approprié à notre problématique de questionnaires (Huang et al., 2011; Liao et al., 2012; Ngai et al., 2009). Nous avons convergé notamment sur une procédure hiérarchique d'analyse (AHP[33]) très utilisée pour l'aide à la décision de la catégorisation des préférences et des gestes à recommander (Roy, 2004; Saaty and Vargas, 2013).
Le but est de hiérarchiser une liste de gestes à proposer aux foyers, en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques récoltées à partir d'un questionnaire recensant les paramètres des foyers.

Cette méthode requiert l'intégration de connaissances issues d'une expertise permettant l'attribution d'un poids spécifique pour chacun des paramètres catégorisant le geste à proposer. Une combinaison linéaire des pondérations est effectuée pour aboutir à une notation des gestes.

Calcul du poids du critère (à partir de paramètres tels que : complexité, financier, temporel, historique …)

$$w_i = \sum_{p}^{pmax} \alpha_h . w_i^p$$

Avec

- w_i : Poids lié au critère *i*
- w_i^p : Poids lié au critère *i* calculé à partir du paramètre *p*
- α_h : Facteur pondérateur du poids calculé à partir du paramètre *p*
- $pmax$ *:* Nombre de paramètres

Une fois toutes les notes et poids calculés, l'AHP simple est donnée par :

$$\xi = \sum_{i=1}^{c_{max}} w_i \, . \, x_i$$

Avec

- x_i : note du critère i
- w_i : poids du critère i
- c_{max} : nombre de critères
- ξ : note de l'alternative

Cette méthode présente plusieurs avantages dont celui de ne pas dépendre du nombre de paramètres des foyers ni du nombre de gestes à proposer. Elle sera donc utilisée à l'étape initiale. On propose ensuite d'y intégrer un mécanisme permettant l'amélioration des pondérations des coefficients de l'AHP à partir du retour d'expérience des gestes préalablement proposés.

Malgré les avantages et la simplicité de mise en œuvre de la méthode AHP, l'augmentation du volume de données et la diversification des variables explicatives (qui peuvent subvenir lors de l'intégration d'une nouvelle application) aboutiront à des difficultés inhérentes à la combinatoire du problème. Afin de s'affranchir in fine des dires d'experts nécessaires dans la méthode AHP avec apprentissage, nous nous sommes penchés sur d'autres méthodes afin de donner quelques recommandations à l'entreprise pour faire évoluer sa plateforme.

[33] AHP : Analytic Hierachy Process

Nous avons testé sur les échantillons disponibles de données issues des questionnaires lors de ce projet, quelques méthodes de classification afin d'être en mesure de mieux cibler les nouveaux adhérents à la plateforme et ainsi proposer les gestes les plus pertinents sans avoir eu recours à l'AHP mais uniquement par regroupement de catégories de populations.

Pendant ces investigations, nous nous sommes d'abord confrontés à la réalité des données brutes initiales et avons montré qu'il fallait que l'entreprise obtienne d'abord un échantillon représentatif de la population ciblée pour échafauder un algorithme de classification et d'apprentissage. En effet, l'échantillon fourni pour réaliser nos recherches ne comportait pas assez d'individus pour certaines modalités. Nous ne pouvions pas proposer de classes suffisamment représentatives pour tout ce qui méritait d'être traité.

Ensuite, nous avons mis en œuvre une première méthode de classification (clustering) car n'ayant pas a priori un nombre de catégories à proposer ni de variables à expliquer, le but était justement d'estimer si certains groupes pouvaient émerger des données à notre disposition sans discrimination préalable.

Les techniques de classifications automatiques se basent sur le choix d'une distance métrique. Parmi les plus utilisées, beaucoup proviennent de la distance de Minkowsky :

$$d(x,y) = \left(\sum_{i=1}^{n} \left| x_i - y_i \right|^p \right)^{1/p}$$

Et l'on retrouve le plus fréquemment l'utilisation des trois cas suivants :

Chebychev (p=∞) : $d\left(x,y\right) = \max_{i=1}^{n} \left| x_i - y_i \right|$

Euclidienne (p=2) : $d(x,y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(x_i - y_i \right)^2}$

Manhattan (ou City Bloc) (p=1) : $d(x,y) = \sum_{i=1}^{n} \left| x_i - y_i \right|$

Nous avons retenu la distance de Manhattan car elle s'adapte bien à une comparaison uniforme sur des données binaires et présente l'avantage d'être moins sensible aux individus hors normes car les coordonnées ne sont pas élevées au carré. Cependant ce choix reste arbitraire et de nombreux algorithmes peuvent être mis en compétition selon le domaine d'application.

Voici un exemple de résultats obtenus sur l'échantillon de 681 foyers triés :

groupe	reponses	gestes	abandonne	en_cours	fait_deja
1	**28**	**0**	**0**	**0**	**0**
2	**16**	**4**	**0**	**1**	**0**
3	**10**	**7**	**0**	**0**	**1**
4	9	7	0	0	1
5	7	8	0	0	1
6	6	13	1	1	1
7	6	5	0	0	1
8	5	10	0	1	1
9	5	7	0	0	1
10	5	6	0	0	1
11	5	3	0	0	1
12	5	10	1	0	0
13	5	8	0	0	1
14	5	6	0	0	1
15	5	4	1	1	0

…..

groupe : numéro du groupe
reponses : nombre de foyers dans le groupe
gestes : nombre de geste en communs adoptés par les foyers
abandonne – en_cours – fait_deja : statut des gestes en communs :
valeur 1 : il existe des gestes communs pour ce statut.
valeur 0 : il n'existe pas de gestes communs pour ce statut

À partir de ces groupes, on peut regarder les caractéristiques communes des foyers et ainsi adapter le geste à une catégorie de population.
On peut constater que le premier groupe est celui des personnes qui n'ont rien répondu, et est donc inutilisable. Les deuxième et troisième groupes font ressortir quelques éléments intéressants.
Le premier montre un groupe de 16 foyers avec 4 gestes en communs. De plus quand on regarde les caractéristiques des foyers, il ressort que 70% de ce groupe habite une maison individuelle.
Nous avons pu étendre l'analyse en relâchant la contrainte sur les distances entre les différents gestes afin de voir comment se réorganisaient les groupes et ainsi affiner la structuration finale de ces derniers.

Les résultats établis à partir de cet échantillon réduit laissent présager des regroupements intéressants qu'il sera pertinent de consolider avec une méthode de partitionnement, une fois le nombre de groupe établi, comme nous avions pu le faire avec une méthode K-means dans le cas de la segmentation des secteurs de l'industrie diffuse.

L'investigation n'a pu aller plus loin dans la fouille de ces données car l'échantillon était trop faible pour pouvoir établir de réels groupes qui auraient pu servir de base à un algorithme de prévision. Nous avons simplement recommandé des procédures à poursuivre pour parvenir à cette fin si les données recueillies ultérieurement étaient de qualité suffisante. Les résultats de ce projet étant confidentiels à l'époque (dû à leur utilisation au sein de la plateforme) aucune communication scientifique n'a pu être réalisée.

Ce projet a été fort utile pour avancer dans l'analyse des questionnaires relatifs aux comportements des usagers dans un but d'apprentissage et de conseils pour une amélioration des effets escomptés.

Les développements algorithmiques entrepris lors de ces deux projets m'ont permis d'entrevoir des pistes d'avancements dans la gestion plus optimisée de l'énergie et de la production de déchets au sein des ménages (secteur résidentiel). Les approches complémentaires choisies nous ont confortés dans la poursuite de nos recherches dans le domaine du datamining à partir de questionnaires et de données issues de mesures in-situ au secteur tertiaire.

Ce secteur, traditionnellement complémentaire au secteur résidentiel étudié jusqu'alors, nous permet de mener une étude complète du secteur résidentiel/tertiaire. Nous en aurons ainsi une meilleure connaissance que nous pourrons mettre à profit dans nos activités de prospective long terme.

- *Extension au secteur tertiaire*

Que ce soient les Petites et Moyennes Entreprises comme les Petites et Moyennes Industries, toutes fonctionnent au sein de bâtiments tertiaires. Même si elles sont équipées de GTB (Gestion Technique du Bâtiment) ou GTC (Gestion Technique Centralisée) elles ne mettent pas toujours à profit toutes les informations et les possibilités de commande des outils qui sont mis à leur disposition.
En effet, ces systèmes sont souvent utilisés uniquement pour certaines fonctionnalités bien spécifiques (gestion des alertes, sécurité incendie …). Par ailleurs, suivant la taille de la structure, il n'y a pas de personnel dédié au suivi, tant au niveau du bon fonctionnement des outils, que de la performance et du contrôle du système. Dans ce cas, elle peut faire appel à un sous-traitant pour assurer ce travail, souvent dans le seul objectif de minimiser ses coûts de fonctionnement, ne tirant pas réellement partie du potentiel réel de tels instruments.

Dans ce contexte il devient primordial de développer une certaine expertise à mettre dans les produits de gestion du bâtiment afin qu'ils soient capables, avec le minimum d'opérations, d'exploiter le potentiel de tous les capteurs et actionneurs mis en place.

Bien évidemment, suivant l'état du bâtiment, certaines modifications profondes (isolation de l'enveloppe et de ses ouvrants, changement de moyen de production de chaleur et de froid adapté à l'inertie et à l'usage du bâtiment…) sont essentielles à la minimisation des consommations d'énergies et de l'impact du bâtiment sur son environnement. Cependant, de telles modifications ne sont pas toujours faisables ou acceptables par l'utilisateur du bâtiment (qui ne peut être que locataire des murs et donc peu concerné par ces modifications structurelles dont il ne pourra amortir les coûts suivant la durée de son bail).

Cependant, il est quand même possible, par une meilleure gestion de son bâtiment, d'améliorer ses performances et de sensibiliser son exploitant à s'orienter vers des solutions plus efficaces et donc à le guider sur le chemin d'une rénovation plus en profondeur par une série de préconisations et une mise en exergue des potentialités d'économies qui peuvent être réalisées dans son cas précis et non dans l'absolu réglementaire.
Il est important d'avoir, non seulement des tableaux de bord capables d'informer de l'état du bâtiment mais aussi de comparer cet état à un objectif d'amélioration afin de réduire son impact énergétique et environnemental. De nombreux projets, notamment européens, ont été réalisés au travers du FP7[34] (SEEDS[35], KnoholEM[36], BEAMS[37], NEED4B[38], AMBASSADOR[39]…) mais souvent appliqués au grand tertiaire. Le programme Horizon 2020[40] met aussi à l'honneur de très nombreux projets dans ce domaine, avec notamment un appel spécifique sur l'efficacité énergétique dans les bâtiments et bien d'autres encore. En 2015, la France a aussi lancé son programme PACTE pour accompagner le nécessaire changement de pratique dans le secteur. La difficulté d'obtenir les résultats et méthodes émergeants de ces projets qui permettraient de les intégrer directement dans des produits qui pourraient être mis en œuvre sur le terrain nous conduit dès 2011 à entamer des recherches dans ce secteur.

L'expérience acquise dans le secteur résidentiel lors du projet GridTeams nous a amené à réorienter l'approche pour le secteur tertiaire en nous passant de la simulation thermique dynamique. En effet, le but ultime de nos recherches étant l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments par l'étude des mesures in-situ à partir d'un réseau de capteur minimal, il faut qu'à terme nous puissions nous passer de la modélisation complète du bâtiment afin d'obtenir des résultats uniquement par l'usage des capteurs, des questionnaires et de la base de connaissances établie à partir des cas déjà traités.

- Comment se passer de la simulation ?

Cette approche par la simulation est largement utilisée dans la littérature pour de nombreuses applications. De la conception à la réhabilitation en passant par le contrôle, de nombreux outils existent et remplissent tous une fonction spécifique permettant d'alléger les calculs en simplifiant la représentation des systèmes secondaires. Une modélisation complète n'aurait pour influence que d'alourdir les calculs et les incertitudes dans l'évaluation de la performance globale du bâtiment.

[34] FP7 : 7th Framework Programme de l'Union Européenne https://ec.europa.eu/research/fp7/index_en.cfm
[35] http://www.seeds-fp7.com/
[36] http://www.knoholem.eu
[37] http://cordis.europa.eu/project/rcn/100732_en.html
[38] http://need4b.eu
[39] http://ambassador-fp7.eu/
[40] H2020 : programme Horizon 2020de l'Union Européenne https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/

Les recherchent menées dans le domaine de la Simulation Thermique Dynamique (STD) et en particulier à partir de modèles réduits (Peuportier et al., 2016), permettent par exemple de quantifier :

- le rôle de l'inertie du bâti (Munaretto, 2014),
- la représentativité des occupants (Vorger, 2014),
- l'amélioration des stratégies de gestion énergétique (Favre, 2013)…

Ces recherches contribuent à la compréhension des éléments constituants de ce système énergétique par la simulation et la validation expérimentale des résultats simulés.
Il existe aussi une profusion de modèles capables de modéliser les bâtiments d'une façon plus détaillée (EnergyPlus, TRNSYS, ESP-R, Dymola/Modelica voire Matlab/Simulink et bien d'autres). Ils permettent d'inclure, de tester et d'optimiser des lois de commande des équipements au sein du bâtiment. Néanmoins, ils peuvent aussi présenter certaines barrières en vue de l'amélioration de la performance énergétique dans son ensemble (Atam, 2017; Shaikh et al., 2014).

Bien que ces études soient indispensables pour pouvoir proposer de nouveaux concepts et être en mesure d'intégrer les bâtiments (existants et à venir) au sein de leur environnement. Quel que soit le type de modèle utilisé, peu d'études proposent des solutions globales et intégrables simplement pour aider l'exploitant d'un bâtiment à faire des choix pour améliorer la performance de son bâtiment dans son ensemble.

J'ai pris le parti de ne pas faire appel à ces modélisations dans l'approche choisie car pour valider nos recherches, j'ai ciblé une partie du parc particulier. Nous nous focaliserons ainsi sur les bâtiments plutôt anciens du secteur du petit tertiaire ou de la petite industrie.
En effet, le grand tertiaire a souvent fait l'objet d'une modélisation en amont à la conception de l'ouvrage. De plus, ces grands bâtiments sont souvent équipés de systèmes de contrôle centralisés et possèdent des équipes dédiées à la gestion des fluides. Ils font aussi appel à des sociétés de services énergétiques qui s'emploient à l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment, naturellement ou par l'intermédiaire de contrats de performance énergétique par exemple.

Le segment ciblé n'a souvent pas fait l'objet de simulation à la conception et n'a pas la taille suffisante pour faire de sa gestion énergétique une priorité (personnel affecté à la gestion du site). Les algorithmes que nous voulons établir seront là pour aider le gestionnaire du bâtiment dans sa démarche d'intégration de l'efficacité énergétique de son infrastructure sans que cela ne pèse trop dans le budget de son activité. Il faut à la fois que l'investissement ne soit pas trop important dans une première phase, et que les économies ou conseils prodigués aillent dans le sens d'une prise de conscience pour l'inciter à réaliser des investissements plus importants pour sa performance énergétique et environnementale avant qu'il ne la subisse par le biais de l'évolution de la réglementation.

Néanmoins, nous n'excluons pas d'utiliser les modélisations dans un but comparatif ou dans une seconde phase pour consolider notre approche. L'avènement des BIM[41] nous conduira forcement à l'utilisation de la maquette numérique du bâtiment quand elle sera disponible, et donc de tirer parti de tous les outils qu'elle pourra comporter. Par ailleurs, nous reviendrons à la STD quand nous ciblerons plus spécifiquement l'identification et le contrôle des systèmes au sein du bâtiment.

Afin de poursuivre dans cette voie, il nous fallait un terrain d'expérimentation. J'ai donc pu monter un projet avec des entreprises de la région PACA dans le secteur tertiaire :

[41] BIM : Building Information Modeling ou Building information Model, est une maquette numérique du bâtiment qui comporte différentes couches d'informations permettant aux différents corps de métiers interagissant avec le bâtiment de trouver l'information dont ils ont besoin (et qui devrait être à jour).

- Izypeo, start-up proposant le développement de tableaux de bords
- WIT, spécialiste de la GTB
- ActaConsult, cabinet de conseil dans l'analyse environnementale et les bilans carbone.

Le projet SmartEnCo[42] a donc débuté en 2014 après qu'un très long processus ait été entrepris depuis 2011[43] pour sa formalisation puis son financement par la région PACA.

J'ai proposé de mettre au point des algorithmes sous forme de modèle de représentation des connaissances de type système expert. Ils permettent, d'après l'analyse de l'état du bâtiment, et à l'aide des données récoltées dynamiquement à partir de sa GTB d'élaborer des critères. Leur comparaison avec des objectifs répondant aux dernières réglementations permettra ainsi :

- de choisir les lois de commande des systèmes liées aux usages principaux (chauffage, rafraichissement, éclairage, usages spécifiques…) pour en améliorer ses performances énergétiques,
- de proposer des actions (recommandations) qui correspondent à des modifications structurelles et/ou comportementales.

De plus, il permettra dans un second temps, d'évaluer l'impact environnemental (bilan carbone et consommations d'eau) en temps réel suivant les améliorations automatiques ou décidées par l'utilisateur du bâtiment.

Le constat du sous-emploi des GTB lors de leur existence dans ce segment du petit tertiaire et le manque d'informations des actes permettant une meilleure gestion de l'énergie sur de tels sites nous ont conduit à proposer des outils pour mieux tirer parti de ceux déjà en leur possession.
À partir de la mise à disposition des informations pertinentes sur la façon dont ces entités consomment leurs fluides (tableaux de bords simples), les outils développés pourront leur faire réaliser des économies et leur montrer les points clés pour rendre leur bâtiment le plus efficace possible.

- Méthodologie d'élaboration des algorithmes

Notre participation dans le projet consistait à établir deux types d'algorithmes :

- Un algorithme pour le système de GTB qui agira sur les organes de commande afin de réduire les consommations du bâtiment
- Un algorithme de décision, permettant la détermination des préconisations à proposer aux usagers du bâtiment, afin de réduire les consommations d'énergie, d'eau et les émissions de CO_2.

Dans la lignée de l'exploitation des données issues de questionnaires, séries temporelles ou évènementielles que nous avions abordées dans nos précédents projets, la structuration et le type de résultats espérés (choix d'un type de contrôle ou recommandation) font appel à une connaissance issue de l'accumulation d'expertises qui peuvent être traitées par ces techniques issues de l'Intelligence Artificielle (IA) telles que les Systèmes Experts (SE). Vu la diversité des structures et équipements des bâtiments tertiaires, cette approche permet de capitaliser les cas traités.

[42] SmartEnCo : Gestion intelligente Energies, Carbone et Eau

[43] Les appels à projets éligibles pour les TPE n'ayant pas eu les budgets nécessaires en cours d'élaboration du projet, nous avons été labélisé par le pôle de compétitivité CAPENERGIES en 2012 pour pouvoir déposer un APRF avant fin 2012 qui n'a pu aboutir faute de budget. Le projet a donc finalement été aiguillé vers un financement de la région relatif aux « services innovants » que nous avons finalement obtenu fin 2013.

L'avènement des moyens de calcul informatique a vu une bulle se former autour de l'IA dans les années 1960 avec après qu'Alan Turing en 1950 ait soulevé la question de la possibilité pour une machine de « penser ». De nombreux langages informatiques (LISP, PROLOG…) et développements algorithmiques d'apprentissage (Machine Learning, Deep Learning) ont vu le jour pour essayer de reproduire le raisonnement humain à partir d'une machine. Malgré un déclin d'intérêt après les années 1980 dans certains domaines, l'IA fait son grand retour avec l'avènement du Big Data (et de l'Open Data en particulier) et la puissance de calcul des nouvelles générations d'ordinateurs. Le 21 mars 2017, l'IA fait l'objet d'un rapport d'un groupe de travail annonçant que la France doit en devenir un acteur de premier plan.

Désirant construire une base de connaissances à partir de faits issus, d'une part, de la structure des bâtiments et, d'autre part, de dires d'experts pour un meilleur usage ou une amélioration physique des bâtiments selon leur environnement, les systèmes experts m'ont semblé être une option répondant au but que nous nous étions fixé. Les systèmes experts ont aussi eu leur engouement dans les années 1980 avec une abondante littérature décrivant les différentes applications comme DENDRAL, PROSPECTOR, MYCIN… (Hayes-Roth et al., 1983; Waterman, 1985). Plus récemment, des langages dédiés comme CLIPS sont repris et disponibles dans les outils de programmation actuels (Giarratano and Riley, 2004).

Le principe est simple, à partir d'une base de faits et d'une base de règles, un moteur d'inférence permet de construire de nouveaux faits et de répondre à des questions données. Selon le moteur d'inférence, le système sera en mesure de poser des questions intermédiaires à l'utilisateur s'il rencontre une indétermination, et ainsi parvenir à une réponse tout en enrichissant ses bases.

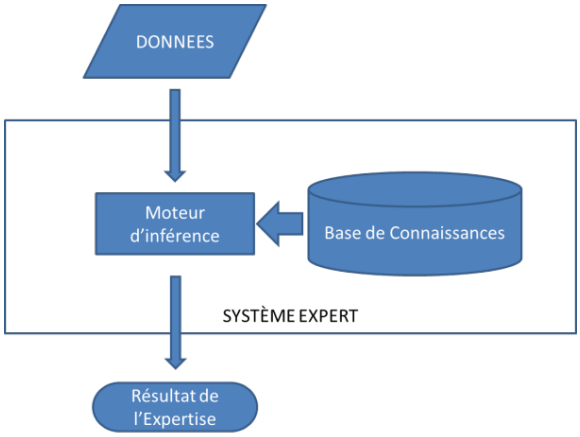


Figure 35 : Principe schématique d'un système expert

La difficulté résidera dans l'établissement de la base de connaissances ainsi que la base des règles pour parvenir à une représentation, la plus complète possible, des cas qui nous concernent. Pour ce qui est des moteurs d'inférences, que ce soient les classiques chainages avant, arrière ou mixtes, ils pourront être améliorés par l'intégration de notions probabilistes (réseaux Bayésiens) par exemple. D'autres moyens permettent un apprentissage automatique selon le retour d'expérience sur la pertinence des réponses recueillies.
Ces solutions ont déjà été déployées dans le domaine du bâtiment. Doukas (Doukas et al., 2007) proposait déjà d'identifier les postes anormalement consommateurs d'énergie à partir de ces principes. Plus récemment, de nombreux progrès ont été réalisés dans l'application de ces méthodologies à la mesure ou au contrôle de l'efficacité de la performance des bâtiments (Nilashi et al., 2015; Peña et al., 2016).

Pour ce projet, la première étape a consisté à élaborer des questionnaires permettant de recueillir toutes les données nécessaires d'une part à l'élaboration d'une base de faits, et d'autre part pour la génération de bases de règles.
La première base de règles que j'ai nommée « réglementaire » permet une première classification du bâtiment au sein d'un segment de performance. Cet état permettra le déclanchement d'une série de conseils de base.
La deuxième base de règles dite « d'expertise » contiendra toute une série de règles provenant de dires d'experts pour l'amélioration structurelle et comportementale du bâtiment et de ses occupants.
L'intégration des mesures in situ permettra de générer des faits issus du calcul d'indicateurs de comportement du bâtiment.

Les moteurs d'inférences, avec l'aide de l'interaction avec l'exploitant du bâtiment et de l'expert, établira de nouveaux faits spécifiques au bâtiment étudié et proposera des solutions aux questions posées au système.
Voici ci-dessous un synoptique de la procédure retenue.

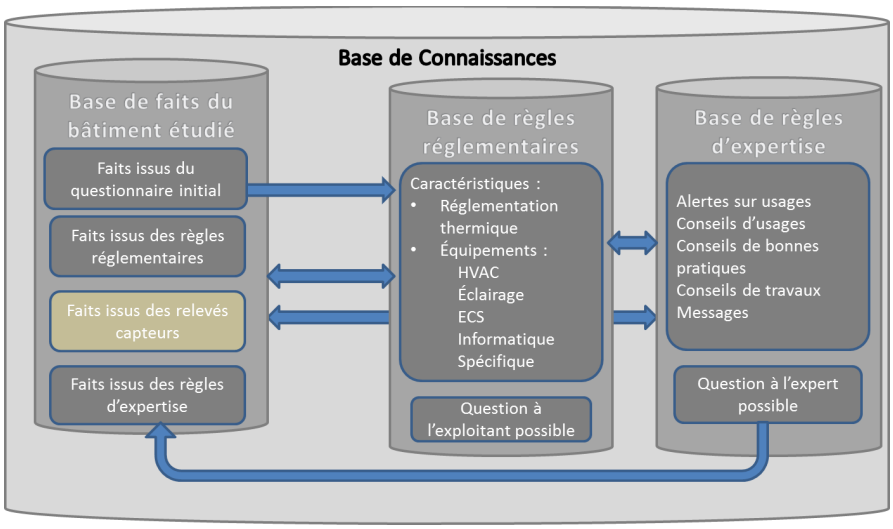


Figure 36 : Principe de fonctionnement de notre système expert

L'étape suivante a été de structurer les bases par la décomposition du bâtiment par usages, pour qu'au sein de chacun d'entre eux (bâti, éclairage, CVC, usages spécifiques…) nous puissions établir les règles pour chacune des bases élaborées.

Enfin, une fois la structuration des bases établie, j'ai décidé des critères à calculer à partir des données in situ et de la base de connaissances (état standard, tendances moyennes, indicateur inertiel, indicateurs par usage ou par poste…). Pour cela nous avions dans le projet deux sites expérimentaux pour lesquels WIT a déployé une série de capteurs et d'actionneurs. Nous pouvions obtenir des séries temporelles et définir des actions dans une seconde phase du projet.

Un résultat permettant l'évaluation de notre indicateur inertiel est donné sous forme d'une évaluation à partir de la réglementation d'un coefficient de déperdition global du bâtiment HLC (en W/K)[44]. Ce coefficient nous permettra de vérifier, à partir des données de consommation relevées et des relevés de températures, de vérifier la véracité des informations initiales entrées et ainsi d'ajuster la variable rénovation le cas échéant. On procède de même pour chacun des postes

[44] HLC : Heat Loss Coefficient, coefficient global qui peut être calculé à partir du Ubat (W/m^2K) réglementaire, des infiltrations et du taux de renouvellement d'air

mettant en jeu des consommations d'énergie, afin d'informer l'exploitant de l'état dans lequel se trouve son bâtiment et ainsi lui prodiguer les conseils adaptés à sa situation particulière. Ces conseils pouvant aller de simples recommandations de changement du type d'éclairage, au changement de températures de consigne, jusqu'au changement de type de contrôle de sa CVC à terme.

De nombreuses investigations existent pour permettre l'évaluation de la performance énergétique du bâti :

- Par Co-Heating (Bauwens and Roels, 2014; Farmer et al., 2016), en mesurant la quantité d'énergie fournie pour le maintien d'une température pendant un temps donné.
- Pour les bâtiments neufs, la méthode ISABELE[45], portée par le CSTB, est en cours d'amélioration au sein du projet MERLIN[46].
- La méthode BEECHAM[47] quant à elle est élaborée à partir d'études statistiques sur les données terrains (Titikpina et al., 2015).
- Récemment le projet EPILOG[48] vient de démarrer pour la mesure rapide de la performance intrinsèque du bâtiment.

Qu'elles soient calculatoires ou expérimentales (intrusives ou non), ces méthodes demandent soit une connaissance approfondie de la structure du bâtiment, soit des campagnes spécifiques de mesures avec des équipements bien définis.
Une méthode rapide développée et brevetée (Isover et al., 2011) par Saint-Gobain (QUB/e) qui demande une instrumentation limitée et des conditions opératoires plus simples à mettre en œuvre correspond en partie à ce que nous voulons développer et que nous sommes en train de tester.

Notre spécificité réside dans l'intégration, dans ce calcul, de données simples et une répétition des séquences de tests sans planification spécifique à partir des zones équipées de capteurs. Certes, les résultats que nous obtenons ne peuvent être certifiés car ils ne répondent pas à un protocole de test éprouvé, mais dans l'approche globale que nous voulons mener, ils permettent tout de même une bonne évaluation de cette partie au regard du reste.

Le premier site équipé fut celui des services techniques de la ville d'Antibes. Ensuite, une partie du parc d'activité de Marineland (le Kid's Island) a été instrumentée sur certaines de ses activités disséminées au sein d'un parc (bâtiments, activités ludiques, restauration, bureaux …).

- Premiers retours

La première phase réalisée par Izypeo fut de mettre à disposition de l'exploitant du bâtiment un tableau de bord permettant d'interagir avec le système. Il propose des informations d'usage du bâtiment et permet aussi de rendre le système expert interactif. Notre rôle a été l'élaboration et le test (à partir du package Pyke sous Python) des mécanismes d'inférences permettant la génération de faits nouveaux à partir des données issues du questionnaire initial proposé.
Nous déterminons par exemple la « classe[49] » de bâtiment pour ensuite évaluer un critère de consommation « normale » à partir des données issues des réglementations thermiques. Cette partie

[45] ISABELE : In Situ Assessment of the Building EnveLope pErformances porté par le CSTB, le COSTIC et le CEREMA http://www.cstb.fr/actualites/detail/isabele-performance-energetique-logement-neuf-0916/
[46] MERLIN : Mesure in situ de la performance Energétique intrinsèque à Réception des LogemeNts, projet porté par le CSTB, le COSTIC et le CEREMA
[47] BEECHAM : Building Energy Efficiency Characterization Method
[48] EPILOG : Evaluation de la Performance Intrinsèque de LOGement, projet soutenu par le PACTE (Programme d'Action pour la qualité de la Construction et la Transition Energétique http://www.programmepacte.fr/) et porté par l'INES et le CES de Mines ParisTech
[49] La « classe », s'apparente au classement par lettre issu des diagnostics de performances énergétiques.

permet de déterminer une consommation moyenne du bâti selon l'état de bâtiment qui a été entré de façon simplifiée à partir de sa localisation, son année de construction, ses éventuelles rénovations, les DJU trentenaires… Ces résultats sont ensuite combinés avec des indicateurs calculés à partir des données in-situ comme l'indicateur inertiel présenté précédemment.

A ce stade, nous n'avons pas encore pu tester ces derniers changements sur site réel car nous avons eu quelques déboires suite à l'inondation subie par le parc Marineland qui a mis un point d'arrêt aux mesures.

Les premiers résultats issus de ces expérimentations sont encourageants pour la validation des mécanismes issus de la base réglementaire. Par contre, nous ne pouvons pas encore nous prononcer sur la validation de la base d'expertise car le projet ayant dû être retardé, nous n'avons pas pu mettre les moyens suffisants pour générer une base de connaissances suffisante pour la tester dans son ensemble. Les algorithmes ont été développés et sont prêts à être implémentés pour être testés (Dran, 2014; Fonkam, 2015).

Ce projet a permis d'élaborer des algorithmes qui permettent d'interagir avec les GTB installées et, à partir de questionnaires, de mesures in-situ, du système expert implémenté, d'initier des réductions de consommation. Il aide à la quantification des travaux à mener pour parvenir à un objectif plus ambitieux de rénovation. Il a aussi permis de prendre conscience de la nécessité et de la difficulté d'obtenir des données fiables et en quantité suffisante pour être en mesure de consolider nos critères entrant dans notre système expert.

En effet, lors du déploiement des capteurs sur nos sites d'expérimentation, nous n'avons pas pu les équiper avec autant de points de mesures que nous le souhaitions, faute de budget. À l'époque (en 2012) la pratique était plutôt de déployer des systèmes filaires. La main d'œuvre pour ce déploiement était donc considérable et les capteurs sans fils n'étaient pas si nombreux dans les protocoles de communications compatibles avec les produits installés.

Ce constat m'a amené à regarder les types et typologies de capteurs qui pourraient nous être utiles dans le cadre du développement de nos algorithmes. Il serait en effet intéressant de tester et déployer nos réseaux de capteurs afin de maitriser la chaine de traitement des séries recueillies et d'être en mesure d'établir le « réseau optimal » à installer pour pouvoir alimenter notre système expert sans trop grever les budgets nécessaires à leur déploiement.

❖ *Données issues de capteurs : comment les envisager pour mieux les valoriser ?*

L'expérience acquise à travers les projets menés dans ce domaine m'a conduit à m'interroger sur la disponibilité des données nécessaires à l'élaboration de nos algorithmes, que ce soit pour l'alimentation d'un système expert gérant globalement le bâtiment, pour élaborer des lois de commandes plus pertinentes à partir des mesures, ou pour identifier le comportement d'un bâtiment par la mesure. Au début des années 2010, les objets connectés n'avaient pas encore inondé le marché des applications en tout genre comme ils le font actuellement. Cependant, l'offre de capteurs sans fil commençait à faire son apparition en dehors du milieu des spécialistes de la GTB pour une application au bâtiment.

➢ Une jungle de protocoles

Les GTB traditionnelles font appel à différents protocoles de communications qui ne sont malheureusement pas tous compatibles et sont parfois même dits « propriétaires » au fabriquant. Il

existe certaines passerelles permettant de relier différents capteurs à des systèmes de supervision multiples faisant du système un outil multi-protocoles. Jusqu'à récemment, il n'existait pas de standard. De nos jours, quelques standards interopérables ont conquis le marché : BACnet[50], Modbus[51] LonWorks[52] et KNX[53].

Par ailleurs, dès que l'on se place dans le cadre de la rénovation des bâtiments, se pose la question des coûts d'installation de ce type de GTB basée sur des protocoles de communications filaires qui sont parfois inaccessibles. Les capteurs basés sur des communications sans fils se sont démocratisés ces dernières années avec, non seulement de nombreux protocoles différents, mais aussi plusieurs alliances. Nous sommes devant un choix Cornélien dès que nous devons choisir une technologie en espérant ne pas faire le mauvais choix d'une alliance ou d'un protocole qui risquerait de ne plus exister quelques années plus tard, mettant notre investissement en péril. Cela peut nous rappeler les guerres des formats d'enregistrements vidéo (VHS s'opposant Betamax) ou les supports DVD haute définition (Blu-ray Disc supporté par Sony face au HD DVD supporté par Toshiba) pour lesquelles un des standards a fini par s'éteindre. Nous ne voudrions pas subir les mêmes déconvenues…

Le domaine du capteur sans fil est riche en protocoles avec chacun des atouts et limites et il est très difficile pour le profane, non seulement de connaitre tout ce qu'il existe mais aussi d'estimer ses besoins.
Des nouveaux modèles technologiques et économiques permettent une transmission sans fil d'une information bas débit sur le territoire à partir d'un réseau radio dédié émergent comme le LoRa[54] ou Sigfox[55]. Ils ont été suivis par de nouveaux entrants liés aux opérateurs de téléphonie mobile (Bouygues, Orange et Objenious[56] (utilisant LoRa) ou Qowisio[57] (utilisant les deux bandes UNB[58] (de Sigfox) et LoRa rendant les deux interopérables). Ces réseaux permettent, moyennant abonnement, de ne déployer que des capteurs sans autre infrastructure pour accéder aux données sur le réseau internet.
Ces nouveaux modes correspondent davantage à l'avènement de l'internet des objets (IoT : Internet of Things) qu'au GTB. En effet, la faible quantité d'informations et la fréquence réduite d'acquisition ne peuvent être compatibles avec celles requises pour la supervision ou le contrôle d'un bâtiment. Cependant, même s'ils permettent toutefois d'envisager l'équipement ponctuel de sites autonomes ou isolés, ils viennent ajouter à la confusion dans l'offre déjà bien fournie. Néanmoins, les systèmes de GTB actuels bénéficieront sûrement très rapidement des avancés du domaine de l'IoT.

Nous ne traiterons pas des protocoles plus spécialisés comme le DALI[59], pour la gestion des luminaires, ou le très récent Li-Fi[60], qui permet la transmission de l'information à partir de la variation d'une longueur d'onde visible spécifique.

Les traditionnels réseaux locaux reliés à un superviseur sont les plus adaptés à la mesure et au contrôle des équipements au sein d'un bâtiment. Ces réseaux existent depuis plus longtemps mais étaient l'apanage de quelques privilégiés initiés à la domotique ou à l'immotique. Ce n'est que depuis

[50] BACnet : http://www.bacnet.org/ Building Automation and Control (BAC) networks protocole de ASHRAE
[51] Modbus : http://www.modbus.org/
[52] LonWorks : http://www.lonmark.org/ Local operating network développé par Lonmark
[53] KNX : https://www.knx.org/ association fondée à partir de EIBA (European Installation Bus Association), EHSA (European Home Systems Association), BCI (BatiBUS Club International)
[54] LoRa : https://www.lora-alliance.org/
[55] Sigfox : https://www.sigfox.com/fr
[56] Objenious : http://objenious.com/
[57] Qowisio : https://www.qowisio.com/
[58] UNB : Ultra Narrow Band
[59] DALI : http://www.dali-ag.org/
[60] Li-Fi : http://www.lifi-led.com/

peu qu'ils se sont démocratisés et commencent à être intégrés dans les GTB en complément des traditionnels capteurs filaires.

Nous voulons donc pouvoir trouver les capteurs les plus en adéquation avec nos besoins de supervision des équipements des bâtiments.
Pour cela j'ai entrepris de développer un petit laboratoire de tests que nous avons baptisé « fablab » qui nous permet, non seulement, de tester les capteurs et leurs protocoles, mais aussi de générer des historiques de données précieuses pour notre recherche dans l'application des techniques de datamining à l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le bâtiment.

Les capteurs que nous pouvions trouver pour équiper notre Fablab communiquaient avec divers protocoles. Il a donc fallut déterminer, dans un premier temps, le type de capteur indispensable afin d'être en mesure de déployer la chaine d'acquisition adaptée au protocole utilisé (Ahmad et al., 2016).

Trois alliances ont émergé dans des bandes de fréquences de transmission particulières avec souvent des applications privilégiées. Il s'agit de :

- EnOcean[61] : communiquant sur la bande 868 Mhz en Europe, utilisant le mode point à point et ayant la spécificité d'être autonome en alimentation par différents moyens (solaire PV, effet peltier, effet mécanique …).
- Z-Wave[62] : communiquant sur les mêmes bandes que le précédent, utilise un mode réseau maillé. Propose un très grand nombre de capteurs en tout genre.
- ZigBee[63] : communiquant sur la bande 2,4 Ghz, utilise aussi un réseau maillé et propose davantage de composants à intégrer qu'une diversité de capteurs tout usage.

D'autres protocoles déjà existants pour d'autres applications peuvent aussi être utilisés par certains constructeurs comme le Bluetooth LE, Wifi, 6LowPan, ainsi que beaucoup d'autres issus de marques développant des capteurs destinés plus généralement à la domotique et utilisant la même bande de fréquence (433 MHz) avec un codage différent plus ou moins sécurisé (Chacon, Oregon Scientific, Owl, Rfxcom, X10RF…).

Nous voyons qu'il est difficile de trouver un protocole qui puisse nous fournir tous les types de capteurs dont nous avons besoin pour obtenir les données nécessaires au fonctionnement de nos algorithmes. Il faut donc mettre en œuvre une plateforme permettant rapidement :

- d'installer nos capteurs communicants sous différents protocoles,
- de réaliser la chaine d'acquisition,
- de stocker les données,
- de traiter et afficher les données recueillies.

➢ Mise en place de notre Fablab

Suite à l'établissement du MoU avec le BECI de l'UC Berkeley par Nadia Maïzi, j'ai pu rencontrer Thérese Peffer qui travaille dans le domaine de l'élaboration de capteurs pour une amélioration de l'usage des bâtiments. Ces échanges m'ont permis de tester une partie de la chaine d'acquisition qu'ils avaient développée (Dawson-Haggerty et al., 2013, 2010). Depuis quelques années, ils ont pour objectif de mettre au point un système totalement autonome qui permettrait d'inclure un nouveau capteur de façon automatique quel que soit le protocole utilisé. Le système d'acquisition est

[61] EnOcean : http://www.enocean-alliance.org/
[62] Z-Wave : http://z-wavealliance.org/
[63] ZigBee : http://www.zigbee.org/

opérationnel concernant le traitement des data et Metadata (données relatives au type de capteur, type de mesure, localisation…), tout est disponible sur leur système sMAP[64]. Concernant les aspects multi-protocole et les passerelles qui permettraient l'intégration automatique d'un nouveau capteur, les recherches sont en cours. Néanmoins leurs recherches n'intègrent pas forcement les protocoles plus européens comme le Z-Wave par exemple (Fierro and Culler, 2015). Le projet est ambitieux car il traite de toute la chaine et se veut, à terme, universel.

Ces informations et ces échanges m'ont permis de mieux appréhender la façon dont il fallait procéder pour mettre en place notre chaine d'acquisition pour notre laboratoire de test. L'objectif étant différent, nous ferons appel à des logiciels déjà existants pour certaines parties plutôt qu'entreprendre un développement spécifique.

La chaine d'acquisition des données issues des capteurs à tester a été bâtie sur un nano ordinateur, le Raspberry Pi[65] (Jebali, 2015; Saidi, 2016)[66]. Après différents tests de suites logiciels permettant de s'affranchir d'un codage fastidieux, voire parfois impossible avec certains capteurs, de l'appairage et de l'acquisition des trames échangées entre capteur et récepteur, nous avons convergé vers le logiciel libre issu du monde de la domotique multi-protocole, Domoticz[67]. Il permet rapidement d'inclure un vaste panel de nouveaux capteurs dans le réseau et est pourvu d'une interface permettant rapidement de vérifier son intégration.

Ce choix effectué, des passerelles (permettant le transfert de différents Raspberry Pi munis de récepteurs de différents protocoles) ont été développées afin de stocker les données vers une base de données spécialisée dans les séries temporelles (Influx Data[68]) pour y être archivées. Ces passerelles ont été développées à partir d'un daemon (processus d'arrière-plan) de collecte (CollectD[69]) qui permet cette récolte avec un pas de temps paramétrable. D'autres développements spécifiques ont dû être intégrés afin de permettre le test de capteurs issus d'un projet anglais (OpenEnergyMonitor[70]) car ils présentaient des caractéristiques adaptées au type de mesures envisagées.

Enfin, après avoir testé l'outil de Berkeley sMAP (trop lourd pour nos besoins), un outil de visualisation de ces séries temporelles a été installé, afin de pouvoir créer rapidement des tableaux de bords pour y visualiser les données et faire quelques manipulations simples avant d'envisager leur traitement. Vu le type de données récoltées, nous avons opté pour un outil spécialisé pour sa simplicité d'utilisation : Grafana[71].

---

[64] sMAP : Simple Measurement and Actuation Profile, base de données permettant de trouver les données (séries temporelles) et Metadonnées relatives aux capteurs installés.

[65] Nano ordinateur de la taille d'une carte de crédit permettant l'implémentation de différents systèmes d'exploitation et bénéficiant de cartes d'extensions et de connecteurs qui lui confère une souplesse d'utilisation et un vaste domaine d'applications embarquées. Il est développé par la fondation Rapsberry Pi : https://www.raspberrypi.org/

[66] La réalisation du Fablab a mis à contribution plusieurs personnes de l'Ecole en plus des étudiants au cours de leurs missions, notamment Damien Corral du CMA et Yves Lebeslour de la délégation que je tiens à remercier grandement.

[67] Domoticz : https://domoticz.com/ logiciel libre multi plateforme et multi protocoles permettant l'intégration et la gestion de différents capteurs et actionneurs. Il bénéficie d'une très grande base de données de capteurs commerciaux.

[68] Influx Data : base de données spécialisée dans les séries temporelles : https://www.influxdata.com/

[69] Collectd : Daemon permettant la collecte de données à partir d'évènements systèmes à partir de plugins. Il est écrit en langage C (donc très modulaire) et adapté aux systèmes embarqués. https://collectd.org/

[70] Projet Open Energy Monitor : projet développant des solutions pour le monitoring de systèmes https://openenergymonitor.org/

[71] Grafana : http://grafana.org/

Ce Fablab, maintenant opérationnel, nous permet non seulement d'acquérir des historiques de données dont nous avons besoin pour élaborer nos algorithmes, mais aussi de pouvoir tester de nouveaux capteurs qui pourraient permettre un développement plus simple de nos solutions basées sur la mesure in-situ.

Voici un schéma de principe de la plateforme développée ainsi qu'une vue synthétique de son implémentation au sein du CMA (2ème étage du bâtiment A du site de Mines ParisTech à Sophia Antipolis).

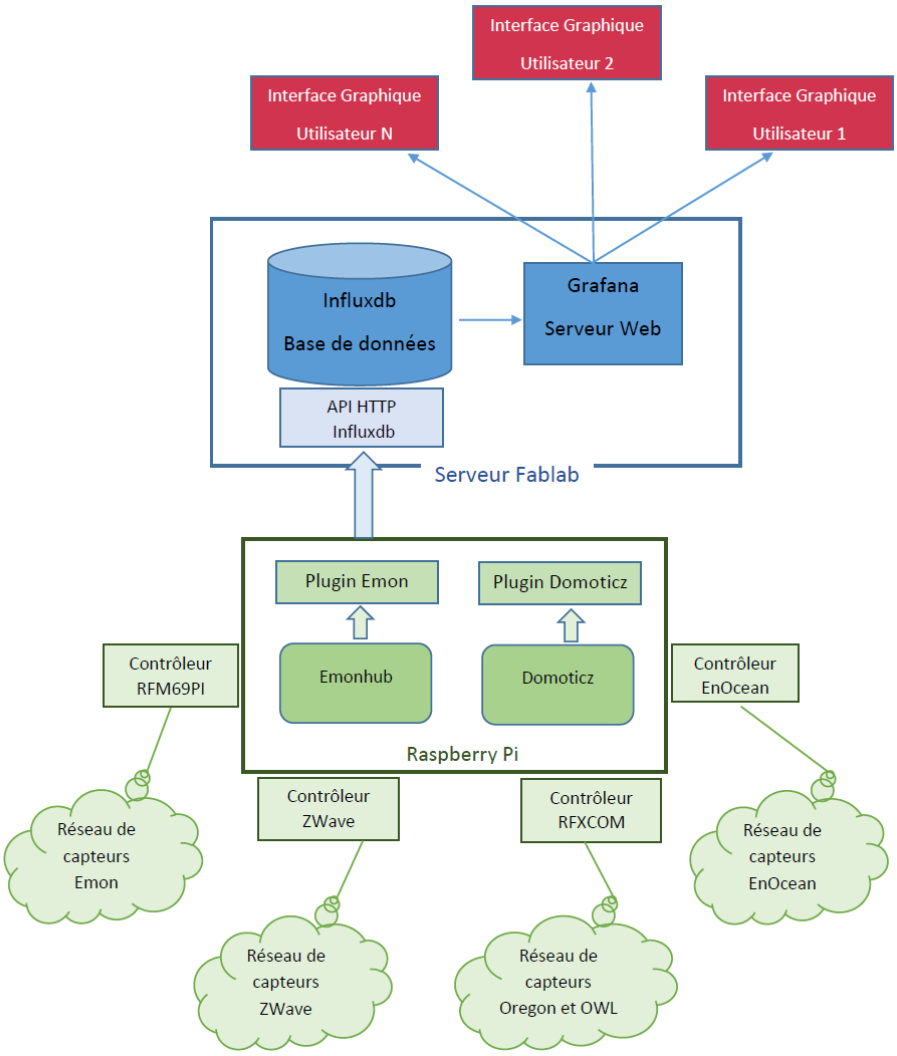


Figure 37 : Schéma de principe de notre Fablab (Saidi, 2016)

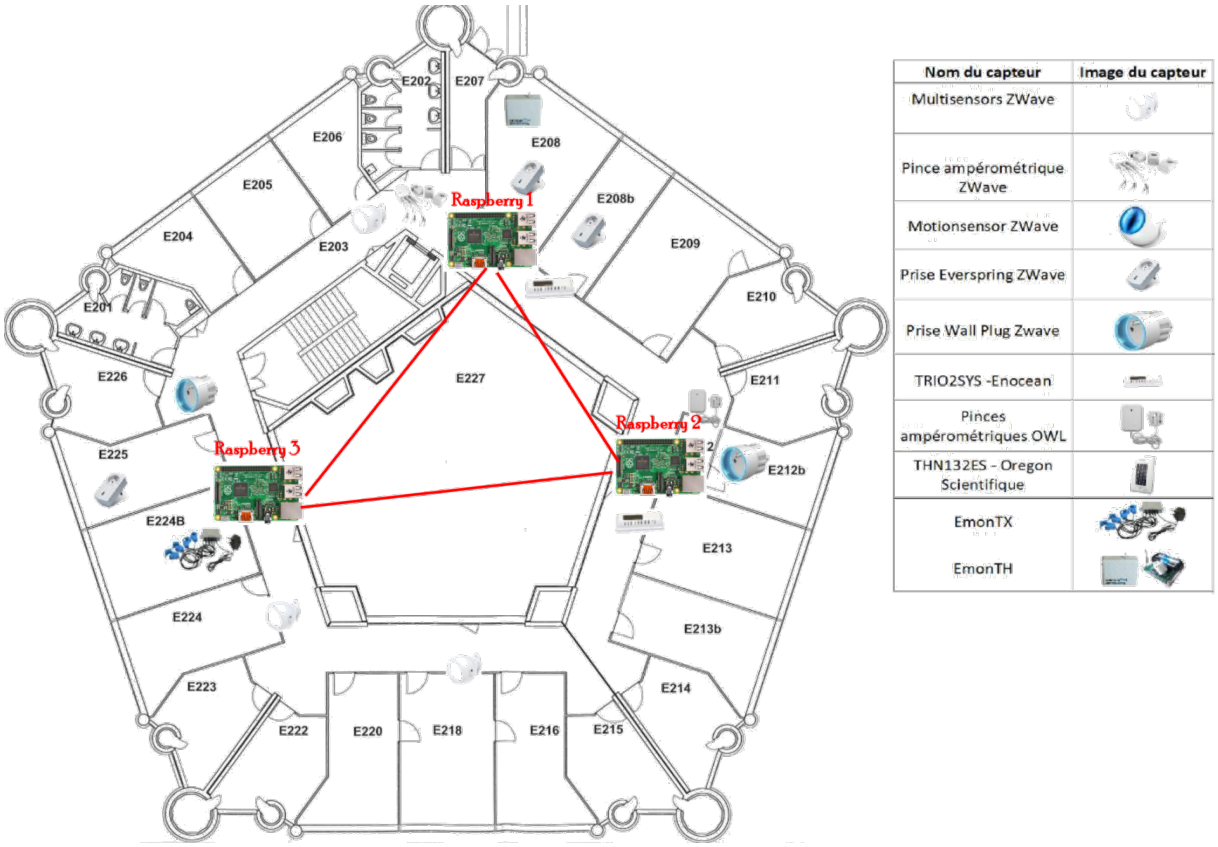


Figure 38 : Implémentation des capteurs et systèmes de collecte au CMA (Saidi, 2016)

Après avoir mis en œuvre certaines méthodologies (à la fois dans le domaine du résidentiel et dans le domaine tertiaire à travers deux expérimentations), nous avons pu appréhender avec plus de discernement la problématique de la mesure dans le bâtiment par la création de notre Fablab. De plus, celui-ci nous permet d'acquérir des séries temporelles dont nous maitrisons les paramètres pour affiner nos traitements. Nous poursuivons donc nos recherches plus spécifiquement dans le domaine du contrôle des équipements des bâtiments, toujours à partir des données recueillies sur site. Ceci nous conduit donc à regarder plus précisément les méthodes disponibles et utilisées du monde du datamining pour progresser dans le sens de l'efficacité énergétique.

- *Modélisation et Contrôle à partir de données recueillies*

Comme j'ai pu le rappeler dans la genèse de cette partie, j'ai eu l'occasion de développer des algorithmes de contrôle pour le chauffage et le rafraichissement à partir de techniques de logique floue.
Dès le projet OPTINER, à l'époque (1998), la difficulté résidait dans le manque de données sur site ainsi que le manque de place dans les systèmes de GTB embarqués qui demandaient un développement algorithmique peu gourmand en mémoire et en temps de calcul.
Les résultats obtenus par ces méthodes étaient tout à fait acceptables mais pouvaient se heurter à certaines indéterminations qui conduisaient à des erreurs dans le calcul des temps de relances.

L'avènement de la disponibilité de données permet d'entreprendre de nouvelles recherches basées sur l'analyse de ces séries temporelles issues du comportement du bâtiment. Je présente dans la suite quelques pistes dans ce domaine pour une application d'identification du comportement du

bâtiment avant de présenter des techniques de contrôle pour les équipements consommateurs d'énergie.

- Le datamining au service de l'efficacité énergétique du bâtiment

Précédemment, nous avons abordé des notions de datamining pour mettre en évidence certaines caractéristiques à partir de données issues de questionnaires.
Nous allons maintenant nous concentrer sur le traitement des données provenant des capteurs présents dans un bâtiment (températures, consommations d'énergie, présence…) en vue de proposer de nouvelles façons de contrôler les systèmes énergétiques pilotables.

La littérature dans le domaine est très fournie, et l'usage du datamining tend à se généraliser avec, en particulier, l'avènement de l'open data. J'ai choisi le terme de datamining car il englobe toutes les disciplines dédiées à la fouille de données de façon descriptive, inférentielle ou prédictive (statistiques, intelligence artificielle, Machine Learning…) (Gorunescu, 2011; Tufféry, 2012).
Son application au secteur du bâtiment ne cesse de progresser pour affiner la compréhension du fonctionnement d'un bâtiment (Molina-Solana et al., 2017), jusqu'à la gestion de l'énergie consommée (Zhou et al., 2016; Zhou and Yang, 2016).

Pour être en mesure d'explorer les possibilités offertes par la collecte de données en volume dans les bâtiments, nous avons dans un premier temps exploité celles accessibles pour un bâtiment de l'UC Berkeley (Sutardja Dai Hall). En effet, ces études vont nous permettre, non seulement de tester les méthodes, mais aussi de mieux cibler le type de données indispensables qui guideront le déploiement de nos propres capteurs au sein de notre fablab (Jebali, 2015).

La première question qui se pose est la véracité d'un modèle qui serait identifié à partir des mesures issues des capteurs qu'il possède. Ensuite, l'idée sera de réduire les points de mesure à ceux uniquement indispensables afin de rendre la méthode accessible au plus grand nombre de bâtiments. Cette étape sera menée de front avec celle consistant à proposer des améliorations en termes de contrôle.

- L'identification des bâtiments

Ces investigations ont commencé par une première approche classique d'identification. Nous basant sur les données disponibles récoltées (températures, consommations, apports humains et solaires) un modèle a été élaboré, permettant la prévision court terme de la consommation et de la température interne du bâtiment. Ce modèle a été scindé en deux parties : l'une pour la saison de chauffage et l'autre pour la saison de rafraichissement car les systèmes employés peuvent être différents.

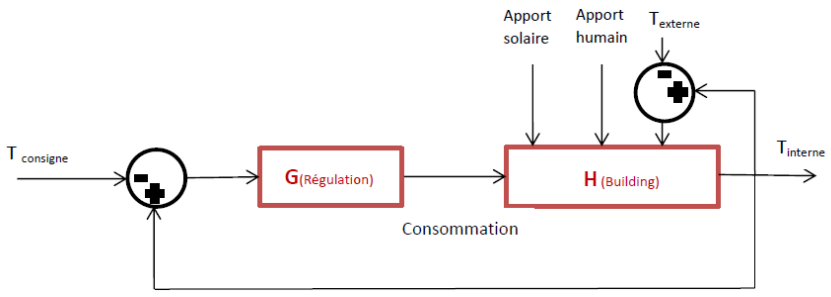


Figure 39 : Schéma d'identification du bâtiment (Jebali, 2015)

Différentes structures d'indentifications ont été testées (ARX[72], ARMAX[73], OE[74]). Les meilleurs résultats ont été obtenus avec une structure ARX (Auto Regressive model with eXternal inputs) d'ordre 4 pour le sous-modèle bâtiment et une structure de type OE (Output Error) d'ordre 3 pour le sous-système régulation. Ce sous-système permet d'identifier la consommation à partir de la différence de température interne/externe. Les performances des modèles ont été comparées à partir du pourcentage d'erreur entre la valeur identifiée et la mesure (pourcentage de « fit » donné par la fonction de coût NRMSE[75]) et de la stabilité de la fonction de transfert.

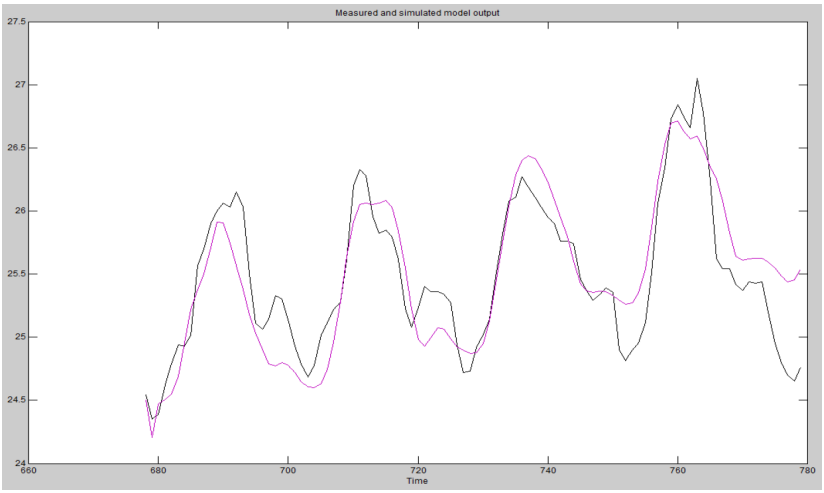


Figure 40 : Comparaison de la température du bâtiment en été du modèle (en rouge) et des valeurs expérimentales (en noir) (Jebali, 2015)

Les résultats montrent une bonne approximation malgré les imprécisions dues :

- au calcul de la consommation (la mesure représente le bâtiment auquel nous avons dû soustraire les consommations d'un laboratoire),
- aux phénomènes qui ne sont, soit pas représentés dans les entrées utilisées, soit dus au comportement humain (ouverture des portes et fenêtres par exemple) venant aussi perturber les résultats.

La dynamique est un peu amortie mais nous sommes dans des erreurs qui peuvent être comparées aux erreurs dans la précision de la mesure.

Une prévision court terme (48h) à partir de ces modèles identifiés permet d'orienter nos choix de variables dans la conception d'algorithmes de régulation visant à réduire les consommations tout en préservant le confort des occupants. Ce premier travail, à partir des techniques d'identification traditionnelles, permet d'envisager de bons résultats avec d'autres techniques faisant appel à davantage de variables.

➢ <u>Les réseaux neuronaux, une souplesse supplémentaire</u>

Cette première étape à partir des méthodes d'identification a pour vocation d'être reproduite pour chaque cas, et l'ajout d'entrées supplémentaires, pour en raffiner les résultats, complexifie la recherche de l'ordre des modèles. Par ailleurs, la linéarité de ces modèles ne permet pas la représentation fidèle du bâtiment surtout au niveau des changements plus brutaux.

[72] ARX : Auto Regressive model with eXternal inputs
[73] ARMAX : Auto Regressive Moving Average with eXternal inputs
[74] OE : Output Error
[75] NRMSE : Normalized Root Mean Square Error

D'autres méthodes, comme les réseaux de neurones, présentent aussi un bon potentiel d'identification de l'évolution des caractéristiques du bâtiment établi en fonction des mesures terrain. De plus, il permet d'intégrer la représentation des non linéarité de façon plus aisée par le biais du choix de fonctions d'activations idoines.

Le principe du réseau de neurone est simple. De très nombreux ouvrages et articles en rappellent les principes (Dreyfus, 2005; Khayatian et al., 2016; Tufféry, 2012).

Le mécanisme s'inspire du fonctionnement des neurones biologiques qui retournent un signal si et seulement si un seuil est atteint, dépendant du nombre de connections (synapses) et du type d'activation (fonction d'activation) liée à ce neurone.

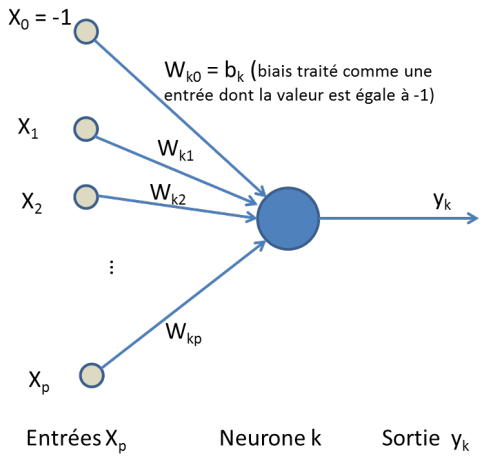


Figure 41 : Représentation schématique d'un modèle de neurone

Chaque synapse est munie d'un poids. Chaque signal x_j à l'entrée de la synapse j connectée au neurone k est multiplié par le poids w_{kj}. Un sommateur va ensuite sommer toutes les entrées pondérées par leur synapse respective. Enfin, cette somme est convertie en signal de sortie y_k grâce à une fonction d'activation, en général non linéaire.

La sortie y_k se calcule grâce aux relations suivantes :

$$u_k = \sum_{j=1}^{p} w_{kj}.x_j$$

$$y_k = \varphi\,(u_k - b_k)$$

avec :

x_j : signal d'entrée j
w_{kp} : poids du neurone k
y_k : signal à la sortie du neurone k
b_k : biais du neurone k
φ : fonction d'activation

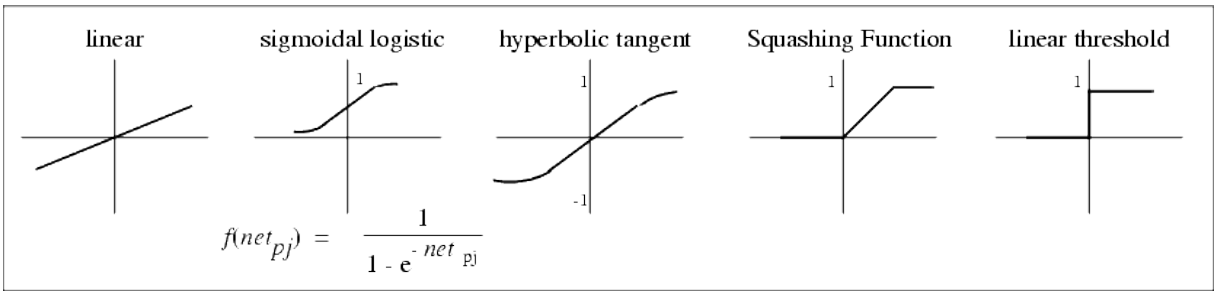


Figure 42 : exemples de fonctions d'activation communes

Ensuite les réseaux se distinguent en fonction du nombre de couches cachées.

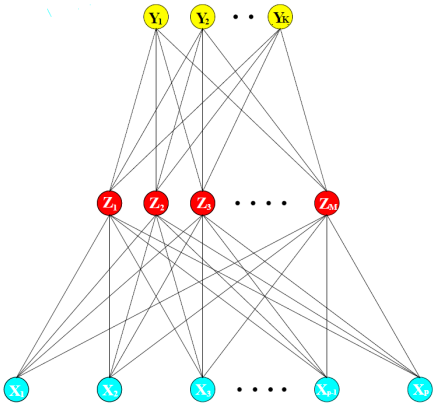


Figure 43 : Schéma d'un réseau de neurone avec une couche de neurones cachée

La mise en œuvre d'un réseau de neurone demande le test de nombreux paramètres en fonction du système à représenter (entrées, nombre de couches, fonctions d'activations, mécanismes d'entrainement…).

Dès 2013 au sein du projet SmartEnCo, j'avais décidé d'évaluer la construction d'un modèle de bâtiment à partir de ces techniques. Cependant, le manque de données de terrain nous a contraints à attendre davantage et à tester simplement la méthodologie sur des données issues de simulations.

Cette méthode d'établissement d'un modèle neuronal ayant pour données d'entrée celles d'un modèle numérique est très courante et on peut voir qu'elle est toujours en vogue actuellement (Ascione et al., 2017). Elle se fait à partir de modèles physiques de STD et permet de tester différents scénarios. Pour notre projet, nous avons pris les données issues du modèle STD Comfie qui se base sur une réduction modale du comportement du bâtiment. Le modèle STD ayant été réduit, l'apprentissage du réseau de neurones est facilité et donne par conséquent de bons résultats qu'il faut interpréter avec précautions. Cette étape a quand même permis d'évaluer la pertinence de cette technique appliquée à ce domaine (Dran, 2014).

Lors de notre collaboration avec l'UC Berkeley, les données étant plus nombreuses, nous avons pu entreprendre une application réelle et ainsi pu tester la véracité de cette méthodologie. Nous ne pouvons que constater au regard de la profusion d'articles dans la littérature (Ascione et al., 2017; Khayatian et al., 2016) que ces méthodes subissent un engouement de la part de la communauté. Ceci nous encourage à poursuivre cette investigation, non seulement dans l'identification du comportement du bâtiment, mais aussi dans l'amélioration du contrôle (Jebali, 2016).

Le cas du bâtiment de l'UC Berkeley a permis d'analyser l'influence des différents paramètres entrant dans l'élaboration d'un modèle de réseaux de neurones. Pour progresser plus rapidement dans nos investigations, nous avons utilisé la toolbox Neural Networks de Matlab.

Cet outil permet d'identifier rapidement le type de réseau neuronal adapté à notre système. Travaillant sur des séries temporelles, nous avons naturellement choisi un modèle qui peut se baser sur une profondeur d'historique de données pour identifier le comportement dynamique du bâtiment. Ce modèle présente trois variantes de calcul, à choisir en fonction de la typologie de son système :

- NARX (Nonlinear AutoRegressive with eXternal inputs) : qui donne y(t+1) fonction de n valeurs précédentes de y(t) et d'un autre vecteur d'entrée x(t)
- NAR (Nonlinear AutoRegressive) : qui donne y(t+1) fonction de n valeurs précédentes de y(t)
- NIO (Nonlinear Input-Output) : donne y(t) fonction de n valeurs précédentes de x(t).

Une fois le type de modèle neuronal identifié pour notre système, nous sommes en mesure de regarder l'influence des paramètres du réseau de neurones sur les résultats obtenus :

- vecteurs de données d'entrée
- décomposition des données (entrainement, validation, test)
- dimension des couches du réseau (nombre de neurones par couches)
- fonctions d'activations (linéaires, sigmoïdes, tangentes hyperboliques…)
- algorithmes d'entrainement (Levenberg-Marquard, Bayésien, Gradient Conjugué…)
- profondeur d'historique des données (n)

Pour chacun de ces paramètres, les résultats sont comparés selon les erreurs RMSE (Root Mean Square Error) ainsi que le temps de calcul nécessaire pour l'entrainement du système.

Après avoir étudié les différents paramètres du réseau, voici le réseau ayant permis les meilleurs résultats pour identifier la consommation du bâtiment :

- Vecteur de données d'entrée : [Température intérieure; consigne; Humidité; taux de ventilation; Température extérieure; Présence; taux de CO_2; Calendrier d'occupation ; Rayonnement solaire]
- Nombre de couches: 3
- Nombre de neurones par couches : couche 1 = 18, couche 2 = 26, couche 3 = 1
- Profondeur des valeurs antérieures utilisées dans le calcul : 4 heures
- Fonctions de transfert : couche 1 et 2 : Sigmoïde tangente hyperbolique, couche 3 : Linéaire symétrique saturée
- Répartitions des données : 70% pour l'entrainement, 15% pour la validation et 15% pour le test.

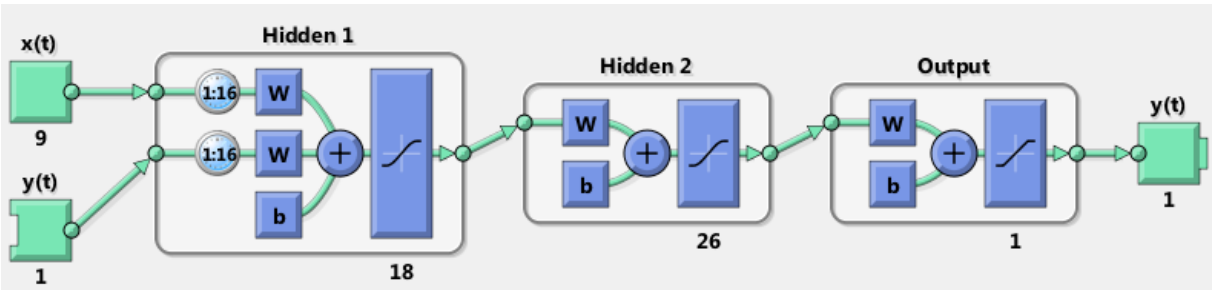


Figure 44 : Schéma de composition du réseau de neurone retenu issu de Matlab.

L'erreur obtenue pour l'évaluation de la consommation de l'étage du bâtiment identifié a été de 1,14 kW (puissance utilisée par pas de temps). La puissance mise en jeu variant de -28 kW à 13 kW, l'erreur RMSE est tout à fait acceptable.

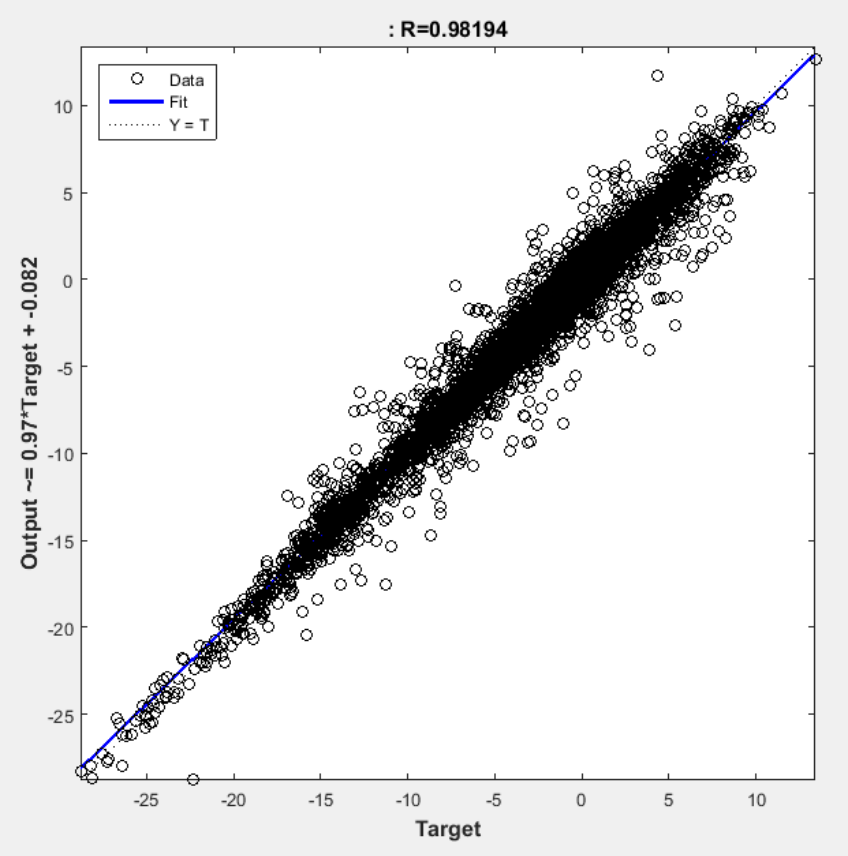


Figure 45 : Droite de régression entre valeur cible et résultat du réseau de neurone

Enfin, nous avons aussi eu l'opportunité de comparer nos réseaux aux résultats issus de la représentation du bâtiment à partir de la modélisation du bâtiment sous Energy Plus. Nous avions à notre disposition le modèle qui avait été réalisé par une équipe de Berkeley.

Les modèles neuronaux ayant été testés et validés, nous avons pu les solliciter en regardant leurs réponses à différentes variations des entrées afin d'évaluer les consommations ou températures dans les prochaines heures. Cette étape servira ultérieurement à alimenter nos algorithmes de contrôle prédictif.

Bien que l'on puisse trouver des références étudiant les paramètres des réseaux neuronaux qu'elles développent, il est important de le faire systématiquement sur tout nouveau réseau car les objectifs et les données utilisées sont très rarement identiques d'une étude à l'autre. Il en est de même pour les sorties qui peuvent également être différentes.

Cette étape a été cruciale dans l'élaboration de nos stratégies de recherche d'algorithmes performants basés sur les données issues des mesures in-situ. Il est important d'avoir la possibilité de tester ces algorithmes sur des modèles qui devront être simples à mettre en œuvre. L'identification puis l'établissement des modèles neuronaux nous ont permis de montrer quelles doivent être les données nécessaires ainsi que la gamme de résultats que l'on peut en attendre pour représenter le comportement d'un bâtiment.

L'étude comportementale du bâtiment, à partir des données in-situ, peut être complétée par des actions directes sur les systèmes équipant le bâtiment. Ainsi, nous pouvons maintenant explorer des méthodes de contrôle pour améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment tertiaire.

➢ Exemple de l'intermittence forte

Les techniques développées à l'époque du projet OPTINER étaient novatrices dans le secteur et se sont bien généralisées depuis quelques années. Lors du projet SmartEnCo, dans lequel nous devions proposer des lois de commandes adaptées en fonction du type de CVC et de l'apprentissage du bâtiment, nous avons pu améliorer les techniques de relance par logique floue grâce aux données supplémentaires récoltées, ainsi que la possibilité d'acquérir des prévisions de températures extérieures dans les heures à venir. Cette donnée supplémentaire s'avère très précieuse pour lever l'ambiguïté qui pesait sur les seules températures intérieures et extérieures dans le calcul du temps de relance. Avec cette prévision, nous pouvons discriminer les cas de deux états du bâtiment différents correspondant aux mêmes températures intérieures et extérieures, et ainsi, assurer une meilleure convergence du mécanisme d'apprentissage sur l'erreur commise.

Text\Tint	Basse	Moyenne	Elevée
Basse	R1 : Temps de relance 1	R2 : Temps de relance 2	R3 : Temps de relance 3
Moyenne	R4 : Temps de relance 4	R5 : Temps de relance 5	R6 : Temps de relance 6
Elevée	R7 : Temps de relance 7	R8 : Temps de relance 8	R9 : Temps de relance 9

Table 2 : Tableau des règles permettant l'évaluation du temps de relance en fonction des températures intérieure et extérieure

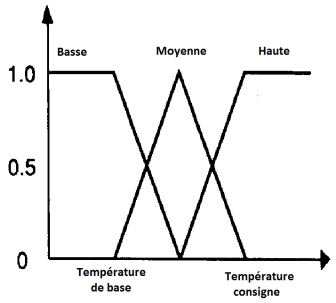


Figure 46 : Type de sous ensemble flou utilisé pour les températures

Nous avons donc ajouté une entrée supplémentaire à notre contrôleur flou, qui sera l'écart entre la température extérieure à l'instant t et celle prévue à l'heure du début de la période d'occupation. Cette entrée supplémentaire, permet d'intégrer une notion de niveau de charge du bâtiment permettant d'éviter la sous-évaluation d'une baisse brusque de la température pendant la période de coupure, et ainsi de mieux anticiper le début de la relance.

deltaText	Text\Tint	Basse	Moyenne	Elevée
Basse	Basse	R1 : Temps de relance 1 corrigé	R2 : Temps de relance 2 corrigé	R3 : Temps de relance 3 corrigé
	Moyenne	R4 : Temps de relance 4 corrigé	R5 : Temps de relance 5 corrigé	R6 : Temps de relance 6 corrigé
	Elevée	R7 : Temps de relance 7 corrigé	R8 : Temps de relance 8 corrigé	R9 : Temps de relance 9 corrigé
Moyenne	Basse	R10 : Temps de relance 1 corrigé	R11 : Temps de relance 2 corrigé	R12 : Temps de relance 3 corrigé
	Moyenne	R13 : Temps de relance 4 corrigé	R14 : Temps de relance 5 corrigé	R15 : Temps de relance 6 corrigé
	Elevée	R16 : Temps de relance 7 corrigé	R17 : Temps de relance 8 corrigé	R18 : Temps de relance 9 corrigé
Elevée	Basse	R19 : Temps de relance 1 corrigé	R20 : Temps de relance 2 corrigé	R21 : Temps de relance 3 corrigé
	Moyenne	R22 : Temps de relance 4 corrigé	R23 : Temps de relance 5 corrigé	R24 : Temps de relance 6 corrigé
	Elevée	R25 : Temps de relance 7 corrigé	R26 : Temps de relance 8 corrigé	R27 : Temps de relance 9 corrigé

Table 3 : Nouveau tableau des règles incluant la prévision de température extérieure au début de la période de relance.

Ces temps de relance, dans chacune de ces nouvelles règles, sont ensuite corrigés en fonction de l'écart (dt) entre la valeur estimée du temps de relance et celle effective. Cette correction est ensuite pondérée et affectée d'un coefficient d'atténuation afin d'amortir les possibles oscillations.

L'avènement de capteurs complémentaires comme le niveau de CO_2 ou les capteurs de présence permettent d'envisager de nouveaux modes de contrôle, basés plus uniquement sur des techniques de logique floue mais aussi sur des techniques de Machine Learning, rendus possible par la quantité et la qualité des données recueillies.

- Le Machine Learning pour le contrôle

Nous avons commencé nos recherches par les réseaux neuronaux, technique particulière du datamining qui mobilise une grande partie de la communauté. Cependant, d'autres peuvent parfois être plus pertinentes dans toutes celles traitant de l'apprentissage machine (le Machine Learning). Le contrôle prédictif a montré de bonnes prédispositions dans diverses applications. En effet, de nombreuses références démontrent leur potentiel dès lors que la disponibilité des données le permet (Marasco and Kontokosta, 2016; Mateo et al., 2013).
Dans le cas du bâtiment, nous nous focaliserons d'abord sur le contrôle de la climatisation par le biais du pilotage d'une VAV[76] au sein du bâtiment test de Berkeley afin de pouvoir implémenter nos algorithmes et les tester en conditions réelles (Jebali, 2016).

Nous avons scindé la recherche d'algorithme de contrôle en deux parties :

- La première consiste à réaliser une prévision de la température intérieure de la zone à contrôler en fonction d'un vecteur d'entrées dépendant des mesures à notre disposition ainsi qu'une prévision de la température extérieure pour la prochaine heure. Ce laps de temps est suffisant pour que le système VAV puisse modifier son régime et ainsi assurer le contrôle de la température intérieure.

  Sur les trois méthodes classiques que nous avons investiguées :
  - SVM : Support Vectror Machine,
  - K-NN : K Nearest Neighbor,
  - BRR : Bayesian Ridge Regression.

  La régression Bayésienne a donné les meilleurs résultats. De plus, par construction, elle permet également de réduire les risques de sur-apprentissage pouvant intervenir dans les régressions. Elle a donc été retenue pour la suite.

- La seconde partie a consisté, à partir des normes de confort et du calendrier des activités hébergées, de définir la vitesse de soufflage ainsi que la température de consigne du système VAV. Une série de tests a permis d'établir des sécurités permettent au système de fonctionner dans un mode dégradé en cas de défaillance du nouvel algorithme. Une fois opérationnel, celui-ci a pu être implémenté et les économies d'énergie estimées.

[76] VAV : Variable Air Volume, partie du système de conditionnement d'air qui assure le maintien de la température d'une pièce par injection d'air à température constance et débit variable.

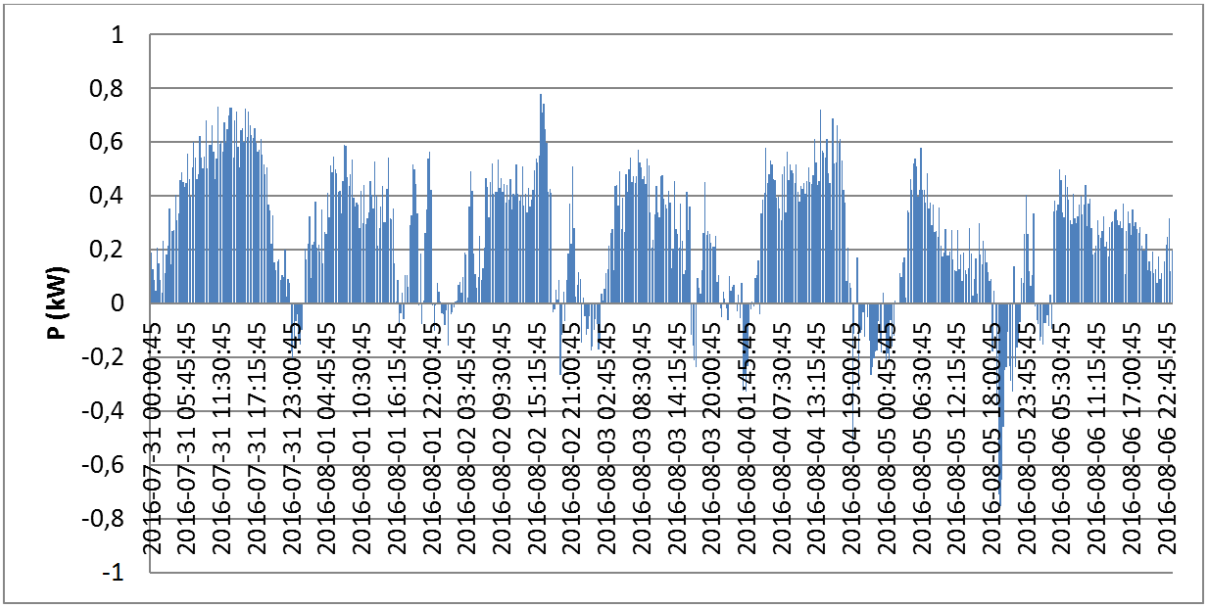


Figure 47 : Exemple de gains issus de l'implémentation d'un contrôle prédictif sur une VAV (Jebali, 2016)

Nous constatons un gain net important dû en partie au fait que sans le nouveau contrôle, les VAV fonctionnaient à un niveau de confort trop élevé pendant les périodes d'inoccupations. Ce contrôle prédictif permet de réaliser une intermittence plus forte grâce à la prédiction de l'état du bâtiment dans les heures à venir qui permet un respect des consignes de confort.

Un simple calcul d'extrapolation du déploiement de ce contrôle à l'ensemble des 129 VAV du bâtiment conduit à une réduction de 42% de l'énergie consommée pour les besoins thermiques.

Le déploiement progressif de cet algorithme est en cours pour le bâtiment Sutardja Dai Hall par les équipes de l'UC Berkeley. Nous attendons les relevés des mesures pour évaluer les gains réels par rapport aux algorithmes précédents.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

J'ai pu montrer que les recherches que j'avais entreprises dès la fin des années 90 par l'implémentation d'algorithmes basés sur des techniques de logique floue ont pu être poursuivies en y intégrant de nouvelles approches.

Lorsque l'on regarde le secteur du bâtiment dans le domaine de l'efficacité énergétique, l'avènement de la mesure et des données qui peuvent être recueillies nous conduisent à rechercher des techniques permettant leur exploitation. Cependant, la séparation reste légitime entre résidentiel et tertiaire tant les applications sont différentes et il faudra adapter les techniques utilisées pour bien intégrer les spécificités comportementales.

Ces données sont multiformes : questionnaires ou mesures in-situ, et peuvent servir des objectifs très différents selon le secteur : l'information, le contrôle ou le conseil.
J'ai pu montrer quelques applications des recherches effectuées avec des méthodes permettant le traitement de ces données. Les résultats nous confortent à poursuivre dans ce sens.

L'intégration des comportements dans le domaine du résidentiel à travers le projet Gridteams nous a permis une première approche de la valorisation des données de questionnaires et de mesures

agrégées. Cette étude a été prolongée avec le projet conduit avec E3D Environnement et se poursuit actuellement dans le résidentiel avec la thèse d'Elise Pupier débutée depuis peu dont je dirai quelques mots en perspective.

Dans le domaine du tertiaire, la problématique étant plus complexe par la diversité des objets étudiés, j'ai entrepris le déploiement d'un fablab qui nous permet :

- de tester les capteurs qui pourraient nous être utiles dans les expérimentations,
- de produire des séries de données pour des équipements spécifiques.

En fonction des données recueillies (questionnaires et relevés), nous avons développé des algorithmes basés sur l'intégration de systèmes experts visant à informer et conseiller les exploitants des bâtiments afin qu'ils puissent réduire leurs consommations et entreprendre des travaux pour poursuivre ces améliorations.
Au-delà de ces systèmes, nous avons poursuivi nos recherches plus spécifiquement dans le contrôle des systèmes de conditionnement d'air (chauffage et climatisation) toujours à partir du recueil de données plus détaillées. L'utilisation de techniques de Machine Learning a montré de bons potentiels pour un meilleur contrôle prédictif dans un bâtiment réel au sein de l'Université de Berkeley.

Je poursuis cette thématique, d'une part, dans le secteur Tertiaire avec l'UC Berkeley qui continue à déployer les algorithmes au sein de leur bâtiment. D'autre part, dans le secteur résidentiel avec une thèse Cifre en collaboration avec l'entreprise WattGo sur l'application de techniques de datamining à un panel important de ménages pour lesquels nous disposons de questionnaires très détaillés et des mesures de consommation avec un pas de temps très fin.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ces vingt années de recherche dans le domaine des systèmes énergétiques m'ont mené à explorer différentes thématiques de recherche autour de, la modélisation, le contrôle et la prospective. Partir d'une approche court terme par la modélisation et le contrôle des systèmes, permet une bonne compréhension des phénomènes et de leur évolution possible en identifiant les verrous techniques.
J'ai pu élargir cette connaissance appliquée au court terme à une vision long terme proposée par l'élaboration de modèles de prospective.
Bien que techniquement très simplifiés, les composants représentés dans nos modèles de prospective doivent représenter au mieux des futurs possibles. Ceci passe par l'élaboration d'une base de connaissances des futures technologies disponibles. La connaissance fine des potentialités des technologies est très utile et permet une vue d'ensemble très importante dans l'analyse des résultats fournis par les modèles.
En ce sens, les deux axes que j'ai pu développer pendant ces années sont très complémentaires.

Les travaux entrepris dans le secteur du résidentiel et tertiaire ont considérablement évolués suite au développement des moyens de mesure et de contrôle. La disponibilité de nouvelles données permet d'entrevoir de nouveaux moyens de contrôle facilitant une transition énergétique de nos stocks de bâtiments anciens.

Je compte poursuivre l'exploration des techniques de datamining, maintenant évaluables par la disponibilité de données en nombre et qualité :

- d'une part, dans le domaine tertiaire en continuant d'exploiter les données par notre collaboration avec l'Université de Berkeley. Le but de cette recherche étant de pouvoir trouver le réseau de capteur (en type et quantité) minimal permettant l'élaboration d'une

stratégie de contrôle visant à minimiser les coûts opératoires énergétiques d'un bâtiment existant.

Dans la continuité de l'établissement de ce réseau minimal, je compte poursuivre mes recherches dans la consolidation du système expert initié pour l'établissement de recommandations d'usages et de rénovation des bâtiments tertiaires à partir justement de ce réseau de capteur minimal.
Cette approche, par la donnée in-situ, complétée par des questionnaires simples s'appuyant sur la capitalisation d'expériences différentes (recueillis sur divers types de bâtiments) inaugure une solution rapidement déployable pour une réhabilitation du parc en douceur.

Concernant le contrôle prédictif des moyens de production de chauffage et climatisation, je compte aussi les lier à ce réseau minimal de capteurs afin de proposer au sein du système expert le système de contrôle le plus adapté au type de production de chaleur/froid et au type d'usage du bâtiment.

- D'autre part, la question du résidentiel reste cruciale et délicate. Elle demande une approche différente et complémentaire. Je poursuis mes recherches dans ce domaine par le biais de la thèse d'Elise Pupier co-encadrée par Valérie Roy et dont l'objet est l'application de méthodes de datamining aux questionnaires et relevés de consommations des ménages.
  Initiée début 2016 avec la start-up WattGo, le traitement initial des données de questionnaire commence à montrer certains liens entre les nombreuses variables des résultats à notre disposition.
  Le but final est l'évaluation des techniques de Machine Learning sur ces variables et la quantification de leur lien avec les consommations globales ou par usage. L'identification de tout lien entre variables explicatives et comportements liés aux consommations d'énergie permettra de conseiller plus efficacement et plus rapidement un nouveau ménage qui aurait des caractéristiques identifiées comme comparables à celles retenues par nos analyses.

Cette thématique de fouille de données est en pleine expansion et génère de très nombreuses publications dont j'ai pu citer certaines très récente au cours de l'exposé des travaux. Chacune explore un domaine particulier (un usage ou un type de bâtiment), mais rien n'est encore disponible, à ma connaissance, dans les deux domaines que je compte poursuivre.

L'étude du secteur résidentiel tertiaire par la voie des données capteurs permettra aussi d'envisager de nouveaux modèles économiques pour l'exploitation des bâtiments anciens au sein de nouvelles entités identifiées sous le terme de smartcities. Il est donc important de pouvoir intégrer ces nouveaux modes de gestion de parcs existants représentant la grande majorité du secteur au sein de nos modèles de prospective long terme.

Une fois mes recherches plus abouties dans ce secteur, je compte proposer l'intégration de ces nouveaux modes de gestion au sein du secteur résidentiel et tertiaire dans nos modèles de prospective long terme, à la fois au niveau régional (à l'échelle d'une smartcity) ou à l'échelle nationale. Le fait d'intégrer un choix supplémentaire intermédiaire, en plus de la rénovation classique représentée par une amélioration de l'efficacité énergétique, permettra au modèle un échelonnement de l'investissement pour satisfaire la contrainte globale du secteur en termes de réduction des consommations.

Les contraintes environnementales pesant sur les systèmes énergétiques étant de plus en plus sévères, la modélisation, le contrôle et la prospective sont des outils indispensables à l'optimisation de tout ou partie du système et nous laisse un champ immense à explorer pour de très nombreuses années…

BIBLIOGRAPHIE

Ahmad, M.W., Mourshed, M., Mundow, D., Sisinni, M., Rezgui, Y., 2016. Building energy metering and environmental monitoring – A state-of-the-art review and directions for future research. Energy Build. 120, 85–102. doi:10.1016/j.enbuild.2016.03.059

AIE, 2016. Energy Technology Perspectives 2016, IEA Publications. ed. Agence Internationale de l'énergie, Paris, France.

AIE, 2015. World Energy Outlook 2015, IEA Publications. ed. Agence Internationale de l'énergie, Paris, France.

Arnaud Fougeyrollas, Boris Le Hir, Pierre Le Mouël, Paul Zagamé, 2015. SIMPATIC Deliverable 9.5: Simulation tests of the new innovation module of NEMESIS with ICT, R&D and other intangibles (Rapport intermédiaire projet Européen No. SIMPATIC working paper no. 32).

Ascione, F., Bianco, N., De Stasio, C., Mauro, G.M., Vanoli, G.P., 2017. Artificial neural networks to predict energy performance and retrofit scenarios for any member of a building category: A novel approach. Energy 118, 999–1017. doi:10.1016/j.energy.2016.10.126

Atam, E., 2017. Current software barriers to advanced model-based control design for energy-efficient buildings. Renew. Sustain. Energy Rev. 73, 1031–1040. doi:10.1016/j.rser.2017.02.015

Bauwens, G., Roels, S., 2014. Co-heating test: A state-of-the-art. Energy Build. 82, 163–172. doi:10.1016/j.enbuild.2014.04.039

Berger, G., de Bourbon-Busset, J., Massé, P., 2007. DE LA PROSPECTIVE - Textes fondamentaux de la prospective française (1955-1966). L'Harmattan.

Bernard, A.L., Vielle, M., 1998. GEMINI-E3, un modèle d'équilibre général national - international économique, énergétique et environnemental. Économie Prévision 136, 1–2. doi:10.3406/ecop.1998.5933

Bouckaert, S., 2013. Contribution des Smart Grids à la transition énergétique : évaluation dans des scénarios long terme (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Boulanger, P.-M., Bréchet, T., 2005. Models for policy-making in sustainable development: The state of the art and perspectives for research. Ecol. Econ. 55, 337–350. doi:10.1016/j.ecolecon.2005.07.033

Burniaux, J.-M., Martin, J.P., Nicoletti, G., Oliveira Martins, J., 1992. GREEN a Multi-Sector, Multi-Region General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO2 Emissions (OECD Economics Department Working Papers). Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

Capros, P., Denise, V.R., Leonidas, P., P, K., C, F., S, T., I, C., Tamas, R., 2013. GEM-E3 Model Documentation. Publications Office of the European Union.

Clarke, L., Wise, M., Edmonds, J., 2008. CO2 Emissions Mitigation and Technological Advance: An Updated Analysis of Advanced Technology Scenarios (DOE Contract No. PNNL-18075).

Club CA2D, 2011. L'Efficacité énergétique du bâtiment tertiaire et collectif dans le 06, Livre Blanc.

Crassous, R., 2008. Modelling long-run scenarios in a second-best world : application to climate policies (phdthesis). AgroParisTech.

Dawson-Haggerty, S., Jiang, X., Tolle, G., Ortiz, J., Culler, D., 2010. sMAP: a simple measurement and actuation profile for physical information. ACM Press, p. 197. doi:10.1145/1869983.1870003

Dawson-Haggerty, S., Krioukov, A., Karandikar, S., Fierro, G., Kitaev, N., Culler, D., 2013. BOSS:Building Operating System Services. Presented at the 10th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI '13), USENIX Association, pp. 443–457.

Delenne, B., Boularan, J., Mode, L., El Golli, R., Bezian, J.-J., Guerassimoff, G., 2001. Stability study of a pressure regulator by modelling and experimental design Etude de stabilité d'un détenteur régulateur modélisation et plan d'expériences, in: 2001 International Gaz Research Conference (IGRC) "Transmission and Storage". Amsterdam, Netherlands, p. 14 pages (CD ROM).

Delenne, B., Nerot-Salhi, S., Guerassimoff, G., 1998. Modélisation - Simulation d'une chaudière modulante : comparaison de différentes stratégies de chauffage, in: IBPSA France'98. Sophia-Antipolis, France, p. CD-ROM.

Després, J., 2015. Modélisation du développement à long terme du stockage de l'électricité dans le système énergétique global (phdthesis). Université Grenoble Alpes.

Després, J., Hadjsaid, N., Criqui, P., Noirot, I., 2015. Modelling the impacts of variable renewable sources on the power sector: Reconsidering the typology of energy modelling tools. Energy 80, 486–495. doi:10.1016/j.energy.2014.12.005

DIRECTIVE 2003/96/CE, 2003. Directive restructurant le cadre communautaire de taxation des produits énergétiques et de l'électricité.

DIRECTIVE 2010/31/EU, 2010. DIRECTIVE sur la performance énergétique des bâtiments.

DIRECTIVE 2012/27/EU, 2012. DIRECTIVE relative à l'efficacité énergétique, modifiant les directives 2009/125/CE et 2010/30/UE et abrogeant les directives 2004/8/CE et 2006/32/CE.

Djemaa, A., 2009. Modélisation bottom-up, un outil d'aide à la décision long terme pour les mesures politiques en matière d'énergie et d'environnement : le modèle TIMES appliqué aux industries grandes consommatrices d'énergie (phdthesis). École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Doukas, H., Patlitzianas, K.D., Iatropoulos, K., Psarras, J., 2007. Intelligent building energy management system using rule sets. Build. Environ. 42, 3562–3569. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.024

Dran, X., 2014. Développement d'algorithmes pour le projet SmartEnCo (Thèse professionnelle Mastère Spécialisé OSE).

Dreyfus, G., 2005. Neural Networks. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.

Drouineau, M., 2011. Modélisation prospective et analyse spatio-temporelle : intégration de la dynamique du réseau électrique (phdthesis). École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

E3MLab, 2014. PRIMES Model- 2013-2014 Detailled model description.

EIA, I., 2016. International Energy Outlook. U.S. Energy Information Administration.

EU Commission, 1993. HERMES: Harmonised Econometric Research for Modelling Economic Systems. ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS B.V.

Farmer, D., Johnston, D., Miles-Shenton, D., 2016. Obtaining the heat loss coefficient of a dwelling using its heating system (integrated coheating). Energy Build. 117, 1–10. doi:10.1016/j.enbuild.2016.02.013

Favre, B., 2013. Etude de stratégies de gestion énergétique des bâtiments par l'application de la programmation dynamique (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Fierro, G., Culler, D., 2015. XBOS: An Extensible Building Operating System (No. UCB/EECS-2015-197). EECS Department, University of California, Berkeley.

Fishbone, L.G., Abilock, H., 1981. Markal, a linear-programming model for energy systems analysis: Technical description of the bnl version. Int. J. Energy Res. 5, 353–375. doi:10.1002/er.4440050406

Fonkam, O., 2015. Développement de systèmes de contrôle adaptatifs pour le tertiaire (Thèse professionnelle Mastère Spécialisé OSE).

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

Giarratano, J.C., Riley, G.D., 2004. Expert Systems: Principles and Programming, Fourth Edition, 4 edition. ed. Course Technology.

Gorunescu, F., 2011. Data Mining, Intelligent Systems Reference Library. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Grohnheit, P.E., 1991. Economic interpretation of the EFOM model. Energy Econ. 13, 143–152. doi:10.1016/0140-9883(91)90047-4

Guerassimoff, G., 2009a. RES2020, le Potentiel d'énergies renouvelables : évaluation et recommandations pour l'implémentation des directives Européennes pour la promotion des énergies renouvelables à l'horizon 2020. La méthodologie TIMES.

Guerassimoff, G., 2009b. RES2020, le Potentiel d'énergies renouvelables : évaluation et recommandations pour l'implémentation des directives Européennes pour la promotion des énergies renouvelables à l'horizon 2020. Le modèle TIMES Européen : scénario et résultats pour l'Europe des 27.

Guerassimoff, G., Assoumou, E., 2010. VALERBIO, Valorisation de la biomasse, rapport de modélisation (TUCK Foundation No. Livrable 1d, 2b, 4), Contrat N° C6145-WZ75. ARMINES.

Guerassimoff, G., Fulcheri, L., 2000a. Optimiseur d'intermittence par logique floue adapté aux systèmes de chauffage électrique dans les bâtiments collectifs, in: Séminaire RCT 2000 - Régulation Commande Télégestion. SOPHIA ANTIPOLIS, France.

Guerassimoff, G., Fulcheri, L., 2000b. Régulateur flou pour la gestion optimisée des systèmes de climatisation par stockage de glace, in: Séminaire RCT 2000, Régulation Commande Télégestion. SOPHIA ANTIPOLIS, France.

Guerassimoff, G., Thomas, J., 2015. Enhancing energy efficiency and technical and marketing tools to change people's habits in the long-term. Energy Build. 104, 14–24. doi:10.1016/j.enbuild.2015.06.080

Hayes-Roth, F., Waterman, D.A., Lenat, D.B., 1983. Building Expert Systems. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA.

Hita, A., Djemaa, A., Guerassimoff, G., Maïzi, N., 2009. Modeling the response of industry to environmental constraint, in: Eceee Summer Study - Act! Innovate! Deliver! Reducing Energy Demand Sustainably. European Council for an Energy Efficient Economy, La Colle sur Loup, France, pp. 1163-1170-NaN-91-633-4454–1.

Huang, I.B., Keisler, J., Linkov, I., 2011. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. Sci. Total Environ. 409, 3578–3594. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.06.022

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

Isover, S.-G., Mangematin, E., Pandraud, G., GILLES, J., Roux, D., 2011. Determination du coefficient de deperdition thermique d'un local. WO2012028829 A1.

Jebali, G., 2016. Smart building: Energy consumption ptimization via machine learning techniques and building modeling with artificial neural networks (Thèse professionnelle Mastère Spécialisé OSE).

Jebali, G., 2015. Bâtiments intelligents : Développement de méthodes de contrôle et d'optimisation pour rationaliser la consommation de l'énergie dans le secteur tertiaire (Stage de fin d'étude 3e année école polytechnique de Tunis).

Kemfert, C., 2001. Economy-Energy-Climate Interaction: The Model Wiagem. doi:10.2139/ssrn.286835

Khayatian, F., Sarto, L., Dall'O', G., 2016. Application of neural networks for evaluating energy performance certificates of residential buildings. Energy Build. 125, 45–54. doi:10.1016/j.enbuild.2016.04.067

Kitous, A., Criqui, Bellevrat, Chateau, 2010. Transformation Patterns of the Worldwide Energy System – Scenarios for the Century with the POLES Model. Energy J. 57–90.

Krakowski, V., 2016. Intégration des EnR au sein d'un modèle de prospective (phdthesis). École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Kriegler, E., Weyant, J.P., Blanford, G.J., Krey, V., Clarke, L., Edmonds, J., Fawcett, A., Luderer, G., Riahi, K., Richels, R., Rose, S.K., Tavoni, M., van Vuuren, D.P., 2014. The role of technology for achieving climate policy objectives: overview of the EMF 27 study on global technology and climate policy strategies. Clim. Change 123, 353–367. doi:10.1007/s10584-013-0953-7

Kypreos, S., 2007. A MERGE model with endogenous technological change and the cost of carbon stabilization. Energy Policy 35, 5327–5336. doi:10.1016/j.enpol.2006.01.029

Lenoir, J.-C., Liébard, A., 2007. PLAN DE DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES À HAUTE QUALITÉ ENVIRONNEMENTALE (No. Comité Opérationel n°10), Grenelle de l'Environnement.

Liao, S.-H., Chu, P.-H., Hsiao, P.-Y., 2012. Data mining techniques and applications – A decade review from 2000 to 2011. Expert Syst. Appl. 39, 11303–11311. doi:10.1016/j.eswa.2012.02.063

Lorne, D., Bouvard, F., Guerassimoff, G., Assoumou, E., 2010. VALERBIO, Valorisation de la biomasse, Définition des hypothèses technico-économiques de conversion de la biomasse (TUCK Foundation No. Livrable 2a), Contrat N° C6145-WZ75. IFP / ARMINES.

Loulou, R., Labriet, M., 2007. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part I: Model structure. Comput. Manag. Sci. 5, 7–40. doi:10.1007/s10287-007-0046-z

Manne, A., Mendelsohn, R., Richels, R., 1995. MERGE. Energy Policy 23, 17–34. doi:10.1016/0301-4215(95)90763-W

Manne, A.S., 1977. ETA-MACRO: A model of energy-economy interactions. NASA STIRecon Tech. Rep. N 78.

Marasco, D.E., Kontokosta, C.E., 2016. Applications of machine learning methods to identifying and predicting building retrofit opportunities. Energy Build. 128, 431–441. doi:10.1016/j.enbuild.2016.06.092

Mateo, F., Carrasco, J.J., Sellami, A., Millán-Giraldo, M., Domínguez, M., Soria-Olivas, E., 2013. Machine learning methods to forecast temperature in buildings. Expert Syst. Appl. 40, 1061–1068. doi:10.1016/j.eswa.2012.08.030

Messner, S., Schrattenholzer, L., 2000. MESSAGE–MACRO: linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively. Energy 25, 267–282. doi:10.1016/S0360-5442(99)00063-8

Messner, S., Strubegger, M., 1995. User's Guide for MESSAGE III (Monograph No. WP-95-069). IIASA.

Millet, G., 2010. VALERBIO, Estimation de la ressource agricole disponible. Scénarios d'offre (TUCK Foundation No. Livrable 1b), Contrat N° C6145-WZ75. INRA.

Molina-Solana, M., Ros, M., Ruiz, M.D., Gómez-Romero, J., Martin-Bautista, M.J., 2017. Data science for building energy management: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 70, 598–609. doi:10.1016/j.rser.2016.11.132

Munaretto, F., 2014. Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Needs 2009 Documents [WWW Document], n.d. URL http://www.needs-project.org/ (accessed 11.3.16).

Ngai, E.W.T., Xiu, L., Chau, D.C.K., 2009. Application of data mining techniques in customer relationship management: A literature review and classification. Expert Syst. Appl. 36, 2592–2602. doi:10.1016/j.eswa.2008.02.021

Nguyen Thi, N., Thivolle-Casat, A., Berthelot, A., 2010. VALERBIO, Valorisation de la biomasse, Synthèse sur la disponiblité de matière ex bois en france, y compris TCR (TUCK Foundation No. Livrable 1a/1c), Contrat N° C6145-WZ75. FCBA.

Nilashi, M., Zakaria, R., Ibrahim, O., Majid, M.Z.A., Mohamad Zin, R., Chugtai, M.W., Zainal Abidin, N.I., Sahamir, S.R., Aminu Yakubu, D., 2015. A knowledge-based expert system for assessing the performance level of green buildings. Knowl.-Based Syst. 86, 194–209. doi:10.1016/j.knosys.2015.06.009

Nordhaus, W.D., 1992. The "DICE" Model: Background and Structure of a Dynamic Integrated Climate-Economy Model of the Economics of Global Warming. Cowles Found. Res. Econ. Yales Univ.

Nordhaus, W.D., Yang, Z., 1996. A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies. Am. Econ. Rev. 86, 741–765.

Odysee, M., 2015. Energy Efficiency Trends and Policies in the Household and Tertiary Sectors.

Olivier Sassi, 2008. L'impact du changement technique endogène sur les politiques climatiques. Paris Est.

Peña, M., Biscarri, F., Guerrero, J.I., Monedero, I., León, C., 2016. Rule-based system to detect energy efficiency anomalies in smart buildings, a data mining approach. Expert Syst. Appl. 56, 242–255. doi:10.1016/j.eswa.2016.03.002

Peters, J.C., Hertel, T.W., 2016. The database–modeling nexus in integrated assessment modeling of electric power generation. Energy Econ. 56, 107–116. doi:10.1016/j.eneco.2016.03.004

Peuportier, B., Pénicaud, H., Collectif, Beausoleil-Morrison, I., 2016. Energétique des bâtiments et simulation thermique. Eyrolles, Paris.

Prieur, A., Guerassimoff, G., Nguyen Thi, N., Jacquet, F., 2010. VALERBIO (Valorisation de la biomasse), Rapport de synthèse, Valorisation énergétique de la biomasse à horizon 2050 (TUCK Foundation No. Synthèse finale), Contrat N° C6145-WZ75. IFP / ARMINES / FCBA / INRA.

RES2020, 2009a. Modelling Distributed Generation and Variable Loads from RES (Rapport intermédiaire projet Européen No. Deliverable D.3.1), EIE/06/170/SI2.442662. Intelligent Energy Europe.

RES2020, 2009b. Reference Document on Renewable Energy Sources Policy and Potential (Rapport intermédiaire projet Européen No. Deliverables D.2.2 and D.2.3), EIE/06/170/SI2.442662. Intelligent Energy Europe.

RES2020, 2009c. Technology Characterisation for Biofuels and Renewable Heating/Cooling (Rapport intermédiaire projet Européen No. Deliverable D.3.2), EIE/06/170/SI2.442662. Intelligent Energy Europe.

RES2020, 2009d. The Pan European TIMES model for RES2020 Model description and definitions of Scenarios (Rapport intermédiaire projet Européen), EIE/06/170/SI2.442662. Intelligent Energy Europe.

RES2020 [WWW Document], n.d. URL http://www.cres.gr/res2020/ (accessed 11.3.16).

Richard Loulou, Uwe Remme, Amit Kanudia, Antti Lehtila, Gary Goldstein, 2016. Documentation for the TIMES Model - PART I: TIMES CONCEPTS AND THEORY.

Rotmans, J., 1990. IMAGE: an integrated model to assess the greenhouse effect. Springer Science & Business Media.

Roy, R. (Ed.), 2004. Strategic Decision Making, Decision Engineering. Springer London, London.

RT 2012, D. no 2012-1530, 2012. Décret no 2012-1530 du 28 décembre 2012 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions de bâtiments, ETLL1240559D.

Saaty, T.L., Vargas, L.G., 2013. Decision Making with the Analytic Network Process, International Series in Operations Research & Management Science. Springer US, Boston, MA.

Saidi, M., 2016. Bâtiments intelligents : Récolte de données issues d'un réseau de capteurs sans fil dans le bâtiment tertiaire et analyse des protocoles étudiés (Stage de fin d'étude 3e année école polytechnique de Tunis).

Sassi, O., 2008. L'impact du changement technique endogène sur les politiques climatiques (phdthesis). Université Paris-Est.

Seck, G.S., 2012. Modélisation prospective de l'industrie diffuse pour l'évaluation de l'impact de politiques de Maîtrise De l'Énergie (MDE) à partir du générateur de modèle TIMES : la récupération de chaleur par Pompes à Chaleur (PAC) dans l'industrie agroalimentaire (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Seck, G.S., Guerassimoff, G., Maïzi, N., 2016. Analysis of the importance of structural change in non-energy intensive industry for prospective modelling: The French case. Energy Policy 89, 114–124. doi:10.1016/j.enpol.2015.11.014

Seck, G.S., Guerassimoff, G., Maïzi, N., 2015. Heat recovery using heat pumps in non-energy intensive industry: Are Energy Saving Certificates a solution for the food and drink industry in France? Appl. Energy 156, 374–389. doi:10.1016/j.apenergy.2015.07.048

Shaikh, P.H., Nor, N.B.M., Nallagownden, P., Elamvazuthi, I., Ibrahim, T., 2014. A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings. Renew. Sustain. Energy Rev. 34, 409–429. doi:10.1016/j.rser.2014.03.027

Titikpina, F., Caucheteux, A., Charki, A., Bigaud, D., 2015. Uncertainty assessment in building energy performance with a simplified model. Int. J. Metrol. Qual. Eng. 6, 308. doi:10.1051/ijmqe/2015022

Tufféry, S., 2012. Data mining et statistique décisionnelle - 4ème édition, 4e édition. ed. Editions technip, Paris.

van Beeck, N.M.J.P., 1999. Classification of Energy Models (Research Memorandum No. 777). Tilburg University, School of Economics and Management.

Vorger, É., 2014. Étude de l'influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment (phdthesis). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Waterman, D.A., 1985. A Guide to Expert Systems. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA.

WEO, 2016. World Energy Outlook. IEA Publications.

Zhou, K., Fu, C., Yang, S., 2016. Big data driven smart energy management: From big data to big insights. Renew. Sustain. Energy Rev. 56, 215–225. doi:10.1016/j.rser.2015.11.050

Zhou, K., Yang, S., 2016. Understanding household energy consumption behavior: The contribution of energy big data analytics. Renew. Sustain. Energy Rev. 56, 810–819. doi:10.1016/j.rser.2015.12.001

ANNEXES

3 exemples de publications majeures

Nicklas FORSELL, Gilles GUERASSIMOFF, Dimitris ATHANASSIADIS, Alain THIVOLLE-CASAT, Daphné LORNE, Guy MILLET, Edi ASSOUMOU,
"*Sub-national TIMES model for analyzing future regional use of Biomass and Biofuels in Sweden and France",*
Renewable Energy 60 (2013) Pages 415-426.

Gondia Sokhna SECK, Gilles GUERASSIMOFF, Nadia MAÏZI,
"Heat recovery using heat pumps in non-energy intensive industry: are energy certificates a solution for the food and drink industry in France?",
Applied Energy 156 (2015) Pages 374-389.

Gilles GUERASSIMOFF, Johann THOMAS,
"Enhancing energy efficiency and technical and marketing tools to change people's habits in the long term",
Energy and Buildings 104 (2015), Pages 14-24.