



HAL
open science

Conception multiacteur de systèmes énergétiques locaux bas-carbone : outils, modèles et analyses qualitatives

Lou Morriet

► **To cite this version:**

Lou Morriet. Conception multiacteur de systèmes énergétiques locaux bas-carbone : outils, modèles et analyses qualitatives. Energie électrique. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2021. Français. NNT : 2021GRALT024 . tel-03285666

HAL Id: tel-03285666

<https://theses.hal.science/tel-03285666v1>

Submitted on 13 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **GÉNIE ÉLECTRIQUE**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Lou MORRIET

Thèse dirigée par **Frédéric WURTZ**, Directeur de recherche, **CNRS**, et
codirigée par **Gilles DEBIZET**, Maître de conférences HDR,
Université Grenoble Alpes

préparée au sein du **Laboratoire de Génie Électrique de Grenoble (G2Elab)** et du **Laboratoire de Sciences Sociales (Pacte)**
dans l'**École Doctorale Électronique, Électrotechnique, Automatique, Traitement du Signal (EEATS)**

Conception multiacteur de systèmes énergétiques locaux bas-carbone : outils, modèles et analyses qualitatives

Thèse soutenue publiquement le **8 mars 2021**,
devant le jury composé de :

Monsieur Arnaud BANOS

Directeur de recherche, CNRS, Examineur

Monsieur Stéphane BRISSET

Professeur des universités, École Centrale de Lille, Rapporteur

Monsieur Gilles DEBIZET

Maître de conférences HDR, Université Grenoble Alpes, Codirecteur de thèse

Monsieur Bruno SARENI

Professeur des universités, Toulouse INP, Président

Monsieur Grégoire WALLENBORN

Professeur, Université Libre de Bruxelles, Examineur

Madame Monika WOLOSZYN

Professeure des universités, Université Savoie Mont Blanc, Rapporteur

Monsieur Frédéric WURTZ

Directeur de recherche, CNRS, Directeur de thèse



Sommaire

NOMENCLATURE	5
SIGLES ET ABBREVIATIONS	5
SYMBOLES MATHÉMATIQUES	7
UNITÉS	7
PREAMBULE	9
INTRODUCTION	11
CHAPITRE I. ANALYSE DE SYSTEMES ÉNERGETIQUES LOCAUX BAS-CARBONE (SELBC) : UN CHANGEMENT DE PARADIGME A PRENDRE EN COMPTE POUR LA CONCEPTION DES SELBC	17
I.1 L'ÉMERGENCE DES SYSTEMES ÉNERGETIQUES LOCAUX BAS-CARBONE REMET EN CAUSE LA FRONTIÈRE QUI SÉPARE CLASSIQUEMENT LES FONCTIONS DE PRODUCTION ET DE FOURNITURE DE LA FONCTION DE CONSOMMATION.....	19
I.2 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES SELBC ET MODALITÉS DE FONCTIONNEMENT À L'ORIGINE D'ENJEUX « SOCIO-TECHNIQUES »	29
I.3 ACTEURS DES SELBC.....	44
I.4 UN NOUVEAU PARADIGME DES SYSTEMES ÉNERGETIQUES AVEC LES SELBC	54
I.5 QUELLES ÉVOLUTIONS DES OUTILS D'AIDE À LA CONCEPTION POUR ACCOMPAGNER LA CONCEPTION DE SYSTEMES ÉNERGETIQUES LOCAUX BAS-CARBONE?	55
CONCLUSION DU CHAPITRE I	58
CHAPITRE II. OUTILS D'AIDE À LA CONCEPTION COMME SUPPORT DE SYNCHRONISATION COGNITIVE ET DE NEGOCIATION ENTRE LES PARTIES PRENANTES D'UN SELBC	59
II.1 OUTILS D'AIDE À LA CONCEPTION POUR QUE LE MODÈLE PUISSE ÊTRE SUPPORT DE NEGOCIATION	62
II.2 LES ENTRÉES DU MODÈLE D'OPTIMISATION MILP COMME OBJETS DE DISCUSSION OU DE NEGOCIATION	73
II.3 LES SOLUTIONS DU MODÈLE COMME OBJET DE NEGOCIATION	80
II.4 LES REPRÉSENTATIONS COMME SUPPORT DE SYNCHRONISATION COGNITIVE	82
II.5 RÉFLEXIONS SUR LES CONDITIONS D'UTILISATION DES MÉTAMODÉLISATEURS D'OPTIMISATION POUR LA NEGOCIATION.....	88
CONCLUSION DU CHAPITRE II	92
CHAPITRE III. PROPOSITIONS DE BRIQUES COMPLÉMENTAIRES POUR ACCOMPAGNER LA NEGOCIATION : APPLICATION SUR LE MÉTAMODÉLISATEUR OMEGALPES	93
III.1 PRÉSENTATION DU MÉTAMODÉLISATEUR OMEGALPES	96
III.2 LES VARIABLES DISCRETES OU LE DIMENSIONNEMENT « IMAGINAIRE » POUR FACILITER LA RÉSOLUTION	99
III.3 LES CONTRAINTES INCOMPATIBLES ET LEUR IDENTIFICATION SELON LEUR DEGRÉ DE NEGOCIATION	100
III.4 LE DÉVELOPPEMENT D'UNE INTERFACE GRAPHIQUE	105
III.5 LE CALCUL ET LA REPRÉSENTATION DES FRONTS DE PARETO	108
CONCLUSION DU CHAPITRE III	111
CHAPITRE IV. ARCHITECTURE D'UN MODÈLE MULTIACTEUR POUR LES PARTIES PRENANTES D'UN SELBC, DÉVELOPPÉ POUR LES MÉTAMODÉLISATEURS D'OPTIMISATION	113
IV.1 LA PRISE EN COMPTE DES ACTEURS DANS LES OUTILS D'AIDE À LA CONCEPTION.....	116
IV.2 PROPOSITION D'UN MODÈLE POUR LES ACTEURS : MODÉLISATION PARCIMONIEUSE ET EFFECTIVE BASÉE SUR LA MODÉLISATION ORIENTÉE OBJET ET LE CONCEPT DE NŒUD SOCIO-ÉNERGETIQUE	124
IV.3 LIMITES DU MODÈLE D'ACTEUR PROPOSÉ.....	133
CONCLUSION DU CHAPITRE IV	135

CHAPITRE V. ANALYSE QUALITATIVE POUR MODELISER LES PARTIES PRENANTES VIA LEURS CONTRAINTES ET OBJECTIFS	137
V.1 METHODOLOGIES DE RECHERCHE ET D'ANALYSES EN SCIENCES SOCIALES : NOS CHOIX VIS-A-VIS DE NOTRE QUESTION DE RECHERCHE.....	140
V.2 METHODOLOGIE D'ANALYSE POUR L'IDENTIFICATION DES RAISONS INFLUENTES DES PARTIES PRENANTES.....	142
V.3 EXEMPLES DE RESULTATS DE L'ANALYSE ET PROPOSITION DE MODELISATION : APPLICATION AU CAS DE LA VALORISATION DE CHALEUR FATALE A DUNKERQUE	159
V.4 LIMITES DE L'ANALYSE ET DE LA MODELISATION ASSOCIEE	176
CONCLUSION DU CHAPITRE V	179
CHAPITRE VI. EXEMPLE D'APPLICATION : SELBC D'AUTOCONSOMMATION COLLECTIVE	181
VI.1 DES OUTILS POUR INITIER LE PROJET	183
VI.2 RECUPERATION ET ANONYMISATION DES DONNEES.....	185
VI.3 PRESENTATION DU CAS D'ETUDE ET DES ASSEMBLAGES SOCIO-ENERGETIQUES ETUDIES	186
VI.4 OPTIMISATION ET RESULTATS	191
CONCLUSION DU CHAPITRE VI	195
CONCLUSION, PERSPECTIVES D'UTILISATION DE L'OUTIL ET DISCUSSION SUR L'INTERDISCIPLINARITE DE NOS TRAVAUX	197
SYNTHESE DE LA THESE.....	197
PERSPECTIVES D'UTILISATION DES TRAVAUX DE CETTE THESE	200
NOS TRAVAUX AU PRISME DE L'INTERDISCIPLINARITE.....	200
REFERENCES	206
BIBLIOGRAPHIE.....	206
WEBOGRAPHIE ET LOGICIELS – PAR ORDRE DE MENTION DANS LA THESE	220
TEXTES REGLEMENTAIRES – PAR ORDRE DE MENTION DANS LA THESE	223
ANNEXES	226
ANNEXE A CARTOGRAPHIE DES REVUES D'OUTILS, DE MODELES, D'APPROCHES MATHEMATIQUES ET D'ALGORITHMES DE RESOLUTION POUR LES SYSTEMES ENERGETIQUES	226
ANNEXE B ETUDE DE L'ALGORITHME LPFICS	229
ANNEXE C CATEGORISATION DES ARTICLES SELON LA PRISE EN COMPTE DES ACTEURS DANS LES PROJETS ENERGETIQUES ...	233
ANNEXE D REPRESENTATIONS GRAPHIQUES D'ASSEMBLAGES SOCIO-ENERGETIQUES.....	238
ANNEXE E PROJET D'AUTOCONSOMMATION COLLECTIVE A SMARTMAGNE	240
ANNEXE F PROJET D'AUTOCONSOMMATION COLLECTIVE DES COLIBRES.....	248
ANNEXE G PROJET DE VALORISATION DE CHALEUR AU VAL D'EUROPE	255
ANNEXE H EXEMPLE DE CONSENTEMENT ECLAIRE POUR LA RECUPERATION DE MATERIAUX (DONNEES ENERGETIQUES, ENTRETIENS, PHOTOS...) EN ACCORD AVEC LA RGPD	266
ANNEXE I RECUPERATION DE CHALEUR DU LABORATOIRE DE CHAMPS MAGNETIQUES INTENSES : LE LNCFMI	269
ANNEXE J PRODUCTION SCIENTIFIQUE.....	277
TABLE DES FIGURES.....	279
TABLE DES TABLEAUX.....	284
TABLE DES ENCADRES	285
TABLE DES MATIERES DETAILLEE	286
RESUME	293

NOMENCLATURE

Sigles et abréviations

Sigles et abréviations	Mots en toutes lettres
ADEME	Agence de la transition écologique (anciennement Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie)
AIMMS	Advanced Interactive Multidimensional Modeling System
AMO	Assistant à Maitrise d'Ouvrage
AMPL	Mathematical Programming Language
ANT	Actor Network Theory
C	Caractéristique
Cst	Contrainte
CAQDAS	Computer Aided Qualitative Data Analysis Systems
CBC	COIN-OR Branch and Cut
CCIAG	Compagnie de Chauffage Intercommunale de l'Agglomération Grenobloise
CEA	Centre d'Énergie Atomique
CGC	Compagnie Générale de Chauffe
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
COP21	Conference Of Parties 21
CPCU	Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain
CRE	Commission de Régulation de l'Énergie
CS	Compromised Solution
CUD	Communauté Urbaine de Dunkerque
CVE	Centre de Valorisation Énergétique
DREAL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DSP	Délégation de Service Public
Eco-SESA	Eco-district: Safe, Efficient, Sustainable and Accessible energy
EDF	Électricité de France
EGL	Énergie Grand Littoral
ELD	Entreprise Locale de Distribution
EnR	Énergies Renouvelables
EnR&R	Énergies Renouvelables et de Récupération
EnRR	Énergies Renouvelables et de Récupération
EPA	Établissement Public d'Aménagement
ERDF	Électricité Réseau Distribution France
GAMS	General Algebraic Modeling System
GEG	Gaz Électricité de Grenoble
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GLPK	GNU Linear Programming Kit
GNU	GNU's Not Unix
GNU GLP3	GNU General Public License
GreEn-ER	Grenoble Énergie - Enseignement et Recherche
G2Elab	Laboratoire de Génie Électrique de Grenoble
IAU IdF	Institut d'Aménagement et d'Urbanisme Ile de France
ILL	Institut Laue-Langevin
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IIS	Irreducible Inconsistent Subsystem

LNCMI	Laboratoire National de Champs Magnétiques Intenses
LP	Linear Programming
LPFICS	Find Incompatible Constraint Sets in Linear Problems
MAPTAM	(Loi de) Modernisation de l'Action Publique Territoriale et d'Affirmation des Métropoles
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MINLP	Mixed Integer NonLinear Programming
MPL	Mathematical Programming Language
NS	Nadir Solution
NEBEF	Notification d'Échanges de Blocs d'Effacement
NIMBY	Not In My Back Yard
NSE	Nœud Socio-Énergétique
OMEGAlpes	Optimisation ModEls Generation As Linear Programming for Energy Systems
ORCU	Opérateur de Réseau de Chauffage Urbain
P-MILP	Projection in Mixed Integer Linear Programming
P	Propriété
PLU	Plan Local d'Urbanisme
PLUi	Plan Local d'Urbanisme intercommunal
PMO	Personne Morale Organisatrice
PNA	Plan National d'Action
POO	Programmation Orientée Objet
RE	Ressource ENR
RES	Referenced Energy System
RGPD	Règlement Général sur la Protection des Données
RI	Raison Influente
RTE	Réseau de Transport d'Électricité
S3PI	Secrétariat Permanent pour la Prévention de la Pollution et des Risques Industriels
SAN	Syndicat d'Agglomération Nouvelle
SCOT	Schéma de Cohérence Territoriale
SDE18	Syndicat Départemental Énergie du Cher
SDCVG	Société pour la Distribution de la Chaleur dans la Ville de Grenoble
SELBC	Système Énergétique Local Bas-Carbone
SEM	Société d'Économie Mixte
SICURD	Syndicat Intercommunal de Chauffage Urbain de la Région Dunkerquoise
T	Thématique
TEPCV	(Loi de) Transition Énergétique pour la Croissance Verte
TURPE	Tarif d'Utilisation des Réseaux Publics d'Électricité
TVA	Taxe sur la Valeur Ajoutée
UIOM	Unité d'Incinération des Ordures Ménagères
UML	Unified Modeling Language
UP	Utopia Point
VE	Vecteur Énergétique

Symboles mathématiques

Symbole	Unité
\in	Appartient à
$ $	Valeur absolue
\forall	Pour tout
Σ	Somme

Unités

Symbole	Préfixe
k	Kilo (10^3)
M	Méga (10^6)

Symbole	Unité
s	Seconde
W	Watt
Wc	Watt-crête
Wh	Watt-heure

Préambule

À tous ceux qui se lancent dans la belle aventure qu'est l'interdisciplinarité,

Cette thèse a l'originalité de s'appuyer à la fois sur les sciences pour l'ingénieur et les sciences sociales. Elle s'inscrit dans le projet interdisciplinaire Eco-SESA¹ (Eco-district : Safe, Efficient, Sustainable and Accessible energy), qui vise à produire des connaissances, des concepts, des outils et des méthodes pour repenser la planification, la gestion et la gouvernance des systèmes énergétiques et qui vise à les rendre sûrs, efficaces, durables et accessibles.

Dans une démarche d'interdisciplinarité, cette thèse a été encadrée par deux chercheurs : Frédéric WURTZ, directeur de recherche CNRS en génie électrique, et Gilles DEBIZET, maître de conférence en urbanisme. Au-delà de l'encadrement, le travail a été mené pendant trois ans au sein de deux laboratoires : le laboratoire de génie électrique de Grenoble et le laboratoire de sciences sociales Pacte. Le projet Eco-SESA et mes travaux m'ont ainsi amenée à travailler avec des ingénieurs, des urbanistes, des géographes, des architectes et des sociologues. Travaillant de manière continue en lien avec ces différents chercheurs, j'ai pu découvrir les différentes approches de recherche, les différentes théories et méthodologies, ou encore les différentes postures du chercheur selon le domaine. J'ai alors pu, dans les échanges, être urbaniste parmi les urbanistes, les architectes, les géographes et les sociologues ; ingénieure parmi les ingénieurs ; et ingénieure parmi les urbanistes, les architectes, les géographes et les sociologues.

Il me faut à présent reprendre ma casquette d'ingénieure pour introduire cette thèse aux ingénieurs, aux urbanistes, aux géographes, aux architectes et à quiconque s'y intéressera. Cette casquette est toutefois un peu plus colorée par les couleurs de la recherche en urbanisme, en architecture et en géographie que d'autres casquettes d'ingénieurs. En tant qu'ingénieure, ce travail, que je considère comme interdisciplinaire, m'a amenée à me baser sur des théories et sur des méthodologies issues des sciences sociales pour proposer une nouvelle modélisation des systèmes énergétiques.

¹ <https://ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr/eco-sesa-program/>.

Introduction

Développer des projets énergétiques bas-carbone pour lutter contre le changement climatique

Depuis 1990 le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC/IPCC) a mis en évidence l'impact des activités humaines sur le changement climatique, notamment via les émissions de gaz à effet de serre (IPCC 1990). Depuis, l'augmentation globale des températures et l'accélération de la fréquence des catastrophes naturelles révèlent l'urgence climatique (IPCC 2014).

L'énergie, aujourd'hui mobilisée dans la majorité des activités humaines, contribue pour deux-tiers aux émissions de gaz à effet de serre (IEA 2019). Deux possibilités sont envisageables pour réduire ces émissions : diminuer les consommations d'énergie, via la sobriété ou l'efficacité, ou transformer la production d'énergie, en mobilisant des ressources énergétiques bas-carbone. Comme le présente l'association négaWatt via ses scénarios², il est nécessaire de s'appuyer sur les trois piliers (sobriété, efficacité, énergies renouvelables) pour limiter le changement climatique.

Les systèmes de production énergétique bas-carbone se basent sur les énergies renouvelables ou les énergies de récupération. On peut distinguer cinq grands types d'énergies renouvelables :

- solaire, à partir de laquelle on peut produire de l'électricité ou de la chaleur
- éolienne, à partir de laquelle on peut produire de l'électricité
- hydraulique, à partir de laquelle on peut produire de l'électricité
- géothermique, à partir de laquelle on peut produire de la chaleur ou de l'électricité selon la température liée à la profondeur de puisage, ou encore
- la biomasse, à partir de laquelle on peut produire du gaz, de la chaleur et/ou de l'électricité, par exemple avec un système de cogénération.

Quant à la récupération d'énergie, il s'agit principalement de la valorisation de chaleur « fatale », ou « perdue », produite dans des cadres très variés (activités électro-intensives, incinération de déchets...).

Un développement plus lent que prévu

Les objectifs d'augmentation des énergies renouvelables dans le mix énergétique français pour lutter contre le changement climatique sont clairement portés par les institutions nationales et internationales. La loi de transition énergétique pour la croissance verte (TEPCV), promulguée en 2015, fixe la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % de la consommation finale brute d'énergie en 2030. Pour cela, des projets énergétiques locaux, portés par des citoyens, des collectivités ou encore des entreprises sont attendus selon la loi TEPCV

² Association négaWatt, page « La démarche négaWatt », *négaWatt*, 2016, consultée en avril 2020, <https://negawatt.org/La-demarche-negaWatt>.

qui contient une section visant à « donner aux citoyens, aux entreprises, aux territoires et à l'Etat le pouvoir d'agir ensemble »³.

Cependant, le développement des énergies renouvelables n'arrive pas à la hauteur de ces objectifs. On peut observer sur le graphique ci-dessous la bifurcation qui s'opère et s'accroît entre les objectifs 2020 et l'augmentation réelle d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie (cf. Figure 1). « En 2017, cette part s'élève à 16,3 %, en deçà des 19,5 % prévus par la trajectoire définie par la France pour atteindre l'objectif 2020 et présentée dans le plan national d'action en faveur des énergies renouvelables (PNA EnR). Le retard constaté concerne à la fois les composantes électrique et thermique » (COLTIER et PLOUHINEC 2019, 17). Dans ce cadre, il semble donc nécessaire d'accélérer le développement des projets énergétiques bas-carbone.

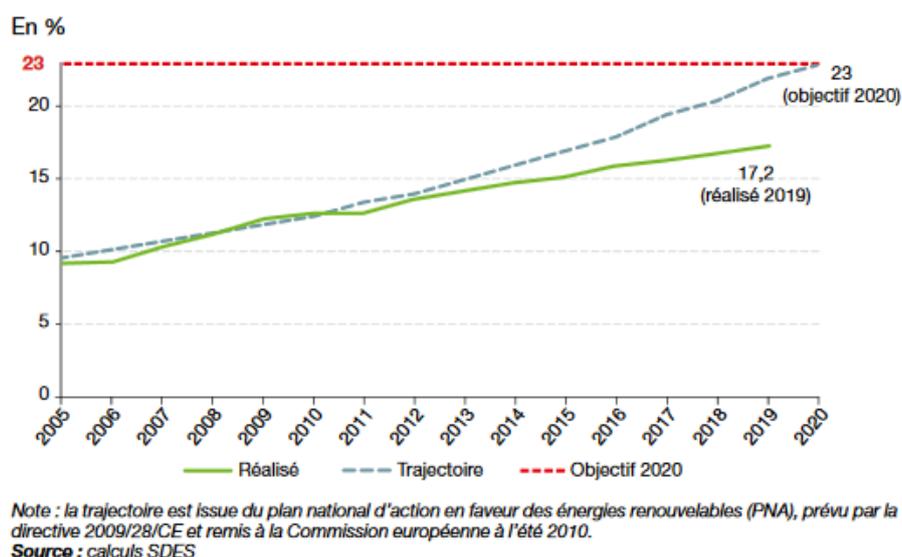


Figure 1 : Différence entre l'objectif annoncé et l'augmentation réelle d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie | Source : (Phan et Plouhinec 2020, 15)

L'émergence des systèmes énergétiques locaux bas-carbone (SELBC)

Les systèmes énergétiques renouvelables et de récupération peuvent prendre des formes très différentes selon le vecteur énergétique utilisé (solaire, éolien, hydraulique, géothermique, biomasse), l'envergure (grands ou petits systèmes énergétiques), la proximité des consommations (zone peu dense ou dense). De plus, selon la forme du projet envisagée, le nombre d'acteurs (un seul ou plusieurs) et le type d'acteurs impliqués diffèrent...

Actuellement, des systèmes énergétiques de capture et d'échanges *in situ* d'énergie renouvelable intermittente ou de récupération émergent. La capture *in situ* d'énergie renvoie à la capacité des systèmes techniques à collecter la ressource énergétique locale. Cette énergie est alors transformée

³ Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.

en vecteur chaleur, gaz ou électricité pour être redistribuée à proximité de la production. Dès lors, les échanges énergétiques sont également caractérisés par leur dimension locale. **Nous parlerons dorénavant de « Systèmes Énergétiques Locaux Bas-carbone » ou encore SELBC.** Nous distinguons les SELBC des systèmes plus « classiques » basés sur les énergies renouvelables, car en développant des échanges locaux d'énergie, ils interrogent, voire remettent en cause, la frontière séparant classiquement les fonctions de production et de fourniture de la fonction de consommation. Les SELBC proposent ainsi, selon nous, un nouveau paradigme pour les systèmes énergétiques.

Apports et plan de la thèse

Dans cette thèse, nous nous proposons d'accompagner la conception des systèmes énergétiques locaux bas-carbone. La conception des systèmes énergétiques est aujourd'hui majoritairement accompagnée par des outils numériques d'aide à la décision que nous appelons outils d'aide à la conception. **Nous faisons l'hypothèse que l'évolution des systèmes énergétiques devrait s'accompagner d'une évolution des outils d'aide à la conception. Cette thèse vise alors à cerner comment les outils d'aide à la conception peuvent accompagner les SELBC et à proposer un outil qui nous semble adapté.** Nous nous intéressons plus particulièrement à la phase de pré-étude, pour laquelle les décisions ont le plus d'impact sur la forme du projet.

Nos travaux s'appuient sur les sciences de l'ingénieur, qui portent notamment sur les systèmes énergétiques depuis de nombreuses années. Par ailleurs les notions de proximité, d'espace et d'urbain sont des notions importantes pour les SELBC. C'est pourquoi nous avons choisi de nous appuyer également sur les disciplines de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire.

La thèse s'articule en six chapitres. Le chapitre I présente les SELBC et leur spécificité. Trois paradoxes sont alors mis en évidence, impliquant des évolutions nécessaires des outils pour accompagner la conception des SELBC. En réponse aux deux premiers paradoxes, le chapitre II identifie un type d'outils qui serait adapté à ces besoins, ainsi que des pistes de développements. Les développements réalisés sont alors présentés dans le chapitre III. En réponse au troisième paradoxe, le chapitre IV introduit une modélisation d'acteurs via des objectifs et des contraintes. Cette modélisation est basée sur une méthodologie d'analyse qualitative d'acteurs impliqués dans des projets passés, qui est présentée dans le chapitre V. Enfin, le chapitre VI applique les développements sur un cas d'étude.

Considérés comme des projets énergétiques émergents, il nous a semblé nécessaire, dans un premier temps, d'analyser et de définir les systèmes énergétiques locaux bas-carbone : leur émergence, leurs caractéristiques, ainsi que les acteurs impliqués dans leur conception et leur fonctionnement. C'est ce que nous présentons dans le chapitre I. Les deux différences majeures, par rapport à des projets énergétiques plus « classiques », sont la remise en cause de la distinction historique entre production et consommation, voire entre fourniture et consommation, et le caractère multiacteur de ces projets. Ces différences entre les SELBC et des projets énergétiques plus « classiques » nous ont amenée à mettre en évidence trois paradoxes vis-à-vis des outils d'aide à la conception :

- **1^{er} paradoxe : Alors que les informations sur le projet sont incertaines en phase de pré-étude (situation exacerbée dans le cas de projets émergents), les décisions prises par les parties**

prenantes ont le plus d'impact. En réponse à ce premier paradoxe, nous proposons que les outils d'aide à la conception des SELBC jouent un rôle d'accompagnement dans les phases de pré-étude. Il nous semble également nécessaire que ces outils prennent en compte la phase de fonctionnement du système.

- **2^{ème} paradoxe : Alors que les SELBC impliquent une multitude d'acteurs dans la conception, les outils d'aide à la conception ont été développés pour un acteur unique.** Ce paradoxe nous a amenée à considérer que les outils d'aide à la conception devraient permettre aux parties prenantes de se comprendre, en devenant support de « synchronisation cognitive » selon le concept développé par (Darses 2009). De plus, ils devraient permettre aux parties prenantes de négocier les décisions prises par chacun pour le SELBC.
- **3^{ème} paradoxe : Alors que les différents points de vue des parties prenantes formatent le SELBC conçu, ils ne sont pas pris en compte de manière explicite dans les modèles.** Ce paradoxe nous a amenée, à l'instar d'autres chercheurs (Hinker et al. 2017; F. G. N. Li, Trutnevite, et Strachan 2015), à considérer que les outils d'aide à la conception devraient intégrer dans leurs modèles les points de vue des acteurs sur le projet, en plus des enjeux techniques, et ce de manière explicite.

Le chapitre II vise à répondre au premier et deuxième paradoxes. En effet, il s'agit de définir quels outils et comment ces outils peuvent accompagner la conception des SELBC en étant support de synchronisation cognitive et de négociation pour les phases de pré-étude des projets. Pour cela, ce chapitre introduit des briques nécessaires à une négociation multipartie prenante, puis présente le recours à un métamodeleur (i.e. proposant des briques⁴ de modèles) d'optimisation open source basé sur un langage orienté objet, avec une interface graphique et des notebooks comme des outils d'aide supports de négociation. Ce chapitre met également en évidence des besoins de briques complémentaires pour les métamoteurs d'optimisation pour accompagner la négociation des parties prenantes : la gestion des contraintes en cas de problèmes sur-contraints, un besoin d'interfaces graphiques, ou encore le calcul automatique de fronts de Pareto, afin de présenter plusieurs solutions.

Le chapitre III présente les briques développées pour répondre à ces besoins. Ces briques sont développées sur le métamoteur OMEGAAlpes, identifié dans la première partie du chapitre précédent, qui est alors présenté plus en détail.

En réponse au troisième paradoxe nous explorons dans le chapitre IV la prise en compte de manière explicite des acteurs dans les modèles. N'identifiant pas de modèles explicites ou adaptés aux métamoteurs d'optimisation, **ce chapitre propose un modèle d'acteur permettant de prendre en compte les parties prenantes des SELBC, ou plus exactement leurs contraintes et leurs objectifs vis-à-vis du projet.** Une bibliothèque de modèles de parties prenantes est ainsi élaborée.

⁴ Nous entendons par le terme « brique » un ensemble de codes associés à un modèle, à une méthode, à une application.

Les acteurs pouvant être très différents, un modèle détaillé des acteurs est nécessaire pour alimenter une bibliothèque de modèles adaptée à la diversité des SELBC. **Dans le chapitre V, nous cherchons à produire ce modèle détaillé à partir des raisons qui influencent la forme du SELBC et qui peuvent être associées à des parties prenantes, que nous appelons « raisons influentes ».** Dans le cadre de la modélisation pour les métamodeleurs d'optimisation, nous proposons de restreindre les raisons influentes aux contraintes et aux objectifs. Le travail d'identification des raisons influentes requiert une analyse fine des parties prenantes des SELBC. **C'est pourquoi nous nous sommes appuyée sur les méthodologies d'enquêtes et d'analyses qualitatives développées et utilisées en sciences sociales, que nous avons adaptées à nos besoins.**

Enfin, le chapitre VI présente, à travers la conception d'un système d'autoconsommation électrique, l'utilisation de briques de modèles développées dans la bibliothèque OMEGAAlpes, afin de montrer comment ces travaux pourraient être réutilisés pour d'autres projets.

La Figure 2 ci-dessous représente les quatre principaux apports de cette thèse :

- une analyse de systèmes énergétiques émergents : les systèmes énergétiques locaux bas-carbone,
- une prise en compte des outils d'aide à la conception comme supports de synchronisation cognitive et de négociation, et le développement de briques associées pour le métamodeleur d'optimisation OMEGAAlpes,
- un modèle d'acteur développé dans le métamodeleur d'optimisation OMEGAAlpes, et
- une méthodologie d'analyse qualitative pour identifier les raisons influentes des acteurs à partir de thèses ou d'entretiens.

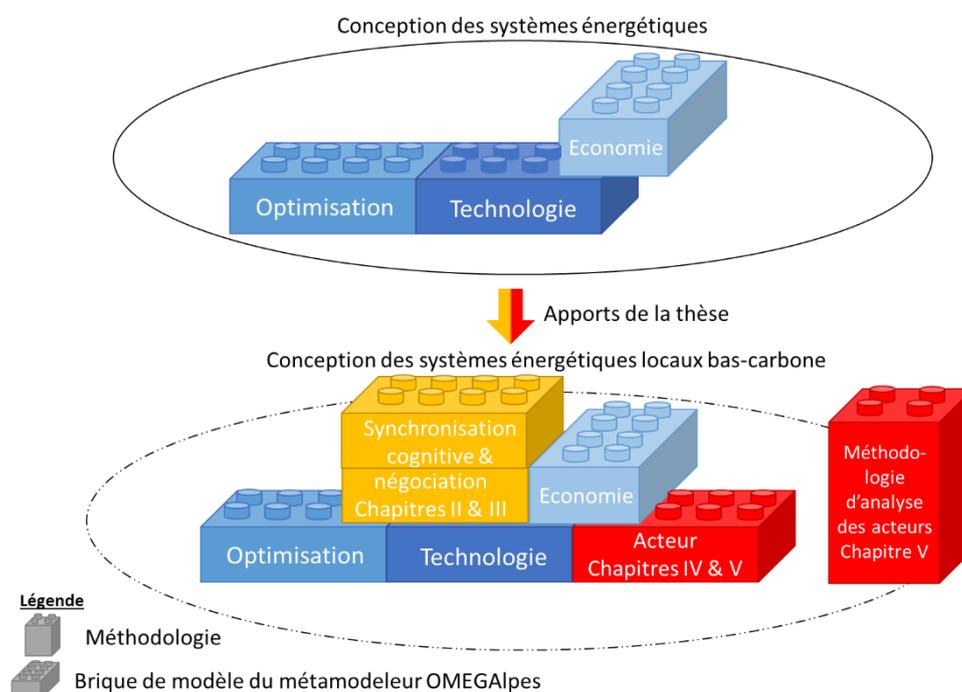


Figure 2 : Représentation schématique des apports de la thèse pour les métamodeleurs d'optimisation | Source : Auteure

CHAPITRE I

Analyse de Systèmes Énergétiques Locaux
Bas-carbone (SELBC) : un changement de
paradigme à prendre en compte pour la
conception des SELBC

I.1	L'ÉMERGENCE DES SYSTÈMES ÉNERGETIQUES LOCAUX BAS-CARBONE REMET EN CAUSE LA FRONTIÈRE QUI SÉPARE CLASSIQUEMENT LES FONCTIONS DE PRODUCTION ET DE FOURNITURE DE LA FONCTION DE CONSOMMATION.....	19
1.1.i	<i>Le développement des grands systèmes énergétiques : un acteur unique et intégré de la production à la fourniture</i>	20
1.1.ii	<i>La libéralisation de secteur électrique et gazier et l'introduction des énergies intermittentes dans le mix énergétique français.</i>	22
1.1.iii	<i>L'émergence des systèmes énergétiques locaux bas-carbone : un rapprochement entre production et consommation qui doit composer avec l'héritage d'une vision centralisée</i>	26
I.2	CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES SELBC ET MODALITÉS DE FONCTIONNEMENT A L'ORIGINE D'ENJEUX « SOCIO-TECHNIQUES »	29
1.2.i	<i>Caractéristiques communes liées au SELBC</i>	29
1.2.ii	<i>Caractéristiques spécifiques aux ressources ou au contexte et contraignantes</i>	34
1.2.iii	<i>Modalités de fonctionnement.....</i>	38
1.2.iv	<i>Du système énergétique à l'assemblage socio-énergétique.....</i>	43
I.3	ACTEURS DES SELBC.....	44
1.3.i.....	<i>Typologie d'acteurs proposée par l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme Île-de-France (IAU IdF)</i>	45
1.3.ii	<i>Typologie d'acteurs proposée dans le cadre du projet Nexus.....</i>	46
1.3.iii	<i>Proposition d'une nouvelle typologie d'acteurs.....</i>	47
I.4	UN NOUVEAU PARADIGME DES SYSTÈMES ÉNERGETIQUES AVEC LES SELBC	54
I.5	QUELLES ÉVOLUTIONS DES OUTILS D'AIDE A LA CONCEPTION POUR ACCOMPAGNER LA CONCEPTION DE SYSTÈMES ÉNERGETIQUES LOCAUX BAS-CARBONE?	55
1.5.i	<i>1^{er} paradoxe : Alors que les informations sur le projet sont incertaines en phase de pré-étude (situation exacerbée dans le cas de projets émergents), les décisions prises par les parties prenantes ont le plus d'impact</i>	55
1.5.ii	<i>2^{ème} paradoxe : Alors que les SELBC impliquent une multitude d'acteurs dans la conception, les outils d'aide à la conception ont été développés pour un acteur unique</i>	56
1.5.iii	<i>3^{ème} paradoxe : Alors que les différents points de vue des parties formatent le SELBC conçu, ils ne sont pas pris en compte de manière explicite dans les modèles</i>	57
	CONCLUSION DU CHAPITRE I	58

Chapitre I. Analyse de Systèmes Énergétiques Locaux Bas-carbone (SELBC) : un changement de paradigme à prendre en compte pour la conception des SELBC

Cette thèse s'intéresse à la conception des systèmes énergétiques de capture et d'échanges *in situ* d'énergie renouvelable intermittente ou de récupération que nous appelons « Systèmes Énergétiques Locaux Bas-carbone » ou encore SELBC. Ce premier chapitre s'attache à analyser et à définir ces systèmes. Nous distinguons les SELBC des systèmes plus « classiques » basés sur les énergies renouvelables, car en développant des échanges locaux d'énergie, ils interrogent, voire remettent en cause, la frontière séparant classiquement les fonctions de production et de fourniture de la fonction de consommation. La première partie de ce chapitre retrace, d'un point de vue historique, l'évolution de cette frontière dans la conception des systèmes énergétiques en France (I.1). Dans la deuxième partie nous présentons les caractéristiques techniques des SELBC et des modalités de fonctionnement qui peuvent être associées (I.2). Pour cela, nous nous sommes appuyée sur des analyses de projets énergétiques que nous considérons comme des SELBC ou proches de ces derniers. Ces analyses sont issues de projets de recherche menés en urbanisme et en aménagement du territoire. Nous mettons alors en évidence l'imbrication entre les systèmes techniques et les acteurs du projet ce qui nous amène à nous intéresser aux acteurs des SELBC. La troisième partie de ce chapitre vise donc à identifier les acteurs intervenant dans la conception et la gestion des SELBC (I.3). Les différences entre les SELBC et les projets d'énergies renouvelables plus « classiques » nous amènent à définir un nouveau paradigme que nous présentons dans une quatrième partie (I.4).

La conception des systèmes énergétiques est aujourd'hui majoritairement accompagnée par des outils numériques d'aide à la décision. **Dans cette thèse, nous faisons l'hypothèse que l'évolution des systèmes énergétiques doit s'accompagner d'une évolution des outils d'aide à la conception, permettant ainsi aux parties prenantes d'être accompagnées dans la conception des SELBC.** Ainsi, cette thèse se donne pour objectif d'identifier et de tester des améliorations à apporter aux outils d'aide à la conception de SELBC. La cinquième partie de ce premier chapitre identifie plusieurs pistes d'amélioration que nous approfondissons dans le cadre de cette thèse (I.5).

I.1 L'émergence des Systèmes Énergétiques Locaux Bas-carbone remet en cause la frontière qui sépare classiquement les fonctions de production et de fourniture de la fonction de consommation

Cette partie présente, d'un point de vue historique, l'évolution de la conception et de la gestion des systèmes énergétiques en France. La conception et la gestion des systèmes énergétiques ont été développées sur un modèle de monopole intégré à partir de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle (I.1.i). Les directives européennes sur la libéralisation de l'énergie ont entraîné une séparation des quatre fonctions nécessaires à la fourniture d'énergie (production, transport, distribution et fourniture). La conception et la gestion des systèmes énergétiques se sont alors développées sur un modèle libéralisé et multiacteur (I.1.ii). L'intégration des énergies renouvelables intermittentes dans le mix énergétique français à ce moment a très peu remis en cause la frontière séparant la fonction de production de celle de consommation. De nouvelles lois, promulguées à partir des années 2015, créent à présent un

espace pour le développement de projets de capture et d'échanges d'énergie (les SELBC) qui redéfinissent la relation, classiquement dissociée, entre la production et la consommation (I.1.iii).

I.1.i Le développement des grands systèmes énergétiques : un acteur unique et intégré de la production à la fourniture

Jusqu'à la fin du XX^{ème} siècle, en France, les projets énergétiques ont majoritairement été développés par un unique acteur, que ce soit pour l'électricité, la chaleur ou le gaz. Cet acteur assurait alors, sur son territoire géographique, les quatre fonctions nécessaires à la fourniture d'énergie chez les consommateurs : la production, le transport, la distribution et la fourniture. Ces fonctions étaient totalement dissociées du rôle de consommateur.

Concernant l'électricité et le gaz, le développement et la gestion étaient au départ généralement menés par des acteurs privés, répartis de manière non homogène sur le territoire français. La nationalisation des entreprises d'électricité en entreprise publique, l'entreprise Électricité de France (EDF), à partir de 1946, crée un monopole pour assurer ces fonctions sur la quasi-totalité⁵ du territoire français. De grands équipements énergétiques, que nous appelons « grands systèmes énergétiques », ont été développés durant cette période : grands barrages hydrauliques, centrales à charbon, centrales nucléaires - avec de grandes capacités de production associées - ou encore un grand réseau de transport maillant le territoire français. (Boutaud 2016) caractérise ce modèle comme « un monopole verticalement intégré à l'échelle nationale. (...) La nature des infrastructures de production, de transport et de distribution entraine en résonance avec ce mode d'organisation : taille importante des centrales, transport longue distance à l'échelle du pays, contrôle centralisé, etc. ». Les centrales étaient localisées en dehors des villes, en zone peu dense, et conçues de manière « hors sol » sans lien avec les dynamiques territoriales (Lopez 2019) ; les réseaux s'attachant néanmoins à respecter la planification urbaine ou, si nécessaire, à la renouveler.

Concernant la chaleur, les premiers réseaux de chauffage urbains ont également été développés par des industriels sous forme de monopoles locaux⁶. Contrairement à l'électricité, il n'y a pas eu d'acteur

⁵ La nationalisation n'a pas eu lieu sur l'ensemble du territoire français. En effet, alors que la majorité des systèmes énergétiques a été développée par des entrepreneurs privés, quelques communes et coopératives d'agriculteurs ont choisi d'assurer par eux-mêmes le développement local des systèmes énergétiques, créant ainsi des Entreprises Locales de Distribution (ELD). Lors de la nationalisation, en 1946, les communes possédant une entreprise locale de distribution sur leur territoire ont pu la conserver (Gabillet 2015, 53-89). Représentant seulement 5% du territoire, nous omettons dans la suite de la thèse de présenter leur statut particulier, que nous considérons, vis-à-vis des fonctions associées à la fourniture d'énergie, comme un « monopole local » qui perdure jusqu'à ce jour.

⁶ Cerema, page « Historique du développement des réseaux de chaleur en France - Réseaux de chaleur et territoires », *Réseaux de chaleur et territoires*, juillet 2012, consultée le 24 avril 2020, <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/historique-du-developpement-des-reseaux-de-chaleur-en-france>.

unique sur l'ensemble du territoire national. La loi relative aux économies d'énergie et à l'utilisation de la chaleur de 1980⁷ reconnaît et encadre le rôle des collectivités locales en matière de développement et de gestion des réseaux de chaleur. Cette compétence est cependant optionnelle et non exclusive. Plusieurs montages, incluant la collectivité, peuvent être envisagés : concession de service public (54% des cas), affermage (27%) ou régie (19%)⁸. Dans les trois cas les fonctions de production, de transport, de distribution et de fourniture restent assurées par un unique acteur : l'autorité locale ou l'entreprise délégataire. S'ajoute à ces trois montages la possibilité de développer un réseau privé géré également sous forme de monopole. Ainsi, des réseaux à l'échelle urbaine sont créés dans certaines villes françaises. À Paris, la Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain (la CPCU) développe, dès 1927, le réseau de chaleur parisien⁹. À Grenoble, la Société pour la Distribution de la Chaleur dans la Ville de Grenoble (la SDCVG) développe, à partir de 1960, le réseau de chaleur grenoblois¹⁰. Deux exemples parmi d'autres, ces réseaux étaient alors alimentés par quelques centrales, majoritairement installées en périphérie.

	Construction du réseau	Exploitation du réseau
Régie	Collectivité	Collectivité
Affermage	Collectivité	Délégataire
Concession	Délégataire	Délégataire
Privé	Entreprise privée	Entreprise privée

Figure 3 : Répartition des rôles pour un réseau de chauffage urbain | Source : Adaptée de Cerema¹¹

⁷ Loi n° 80-531 du 15 juillet 1980 relative aux économies d'énergie et à l'utilisation de la chaleur.

⁸ Cerema, page « Acteurs des réseaux de chaleur - Réseaux de chaleur et territoires », *Réseaux de chaleur et territoires*, janvier 2007, consultée le 24 avril 2020, <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/acteurs-des-reseaux-de-chaleur>.

Cerema, page « Cadre d'intervention des collectivités en matière de réseaux de chaleur », *Réseaux de chaleur et territoires*, mars 2011, consultée le 24 avril 2020, <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/cadre-d-intervention-des-collectivites-en-matiere-de-reseaux-de-chaleur>.

⁹ CPCU, page « Qui sommes-nous », CPCU, consultée le 10 février 2020, <https://www.cpcu.fr/nous-connaître>.

¹⁰ CCIAG, page « Histoire », *Compagnie de chauffage*, consultée le 10 février 2020, <https://www.compagniedechauffage.fr/2331-histoire.htm>.

¹¹ Cerema, page « Acteurs des réseaux de chaleur - Réseaux de chaleur et territoires », *Réseaux de chaleur et territoires*, janvier 2007, consultée le 24 avril 2020, <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/acteurs-des-reseaux-de-chaleur>.

Que ce soit pour l'électricité, la chaleur ou le gaz, les ressources énergétiques utilisées étaient majoritairement fossiles. Il s'agissait de ressources énergétiques dites « de stock », transportables, stockables et utilisables selon les besoins en consommation. Les consommations étaient considérées comme des charges non contrôlables (ou faiblement contrôlables à l'image de la consommation de nuit incitée par une tarification spécifique) que la production devait combler. Les installations (centrales de production et réseaux) étaient alors (sur)dimensionnées pour répondre à la consommation énergétique future.

I.1.ii La libéralisation de secteur électrique et gazier et l'introduction des énergies intermittentes dans le mix énergétique français.

La libéralisation du secteur de l'énergie, i.e. l'ouverture des marchés à la concurrence, a été initiée au milieu des années 90 sous l'impulsion de l'Union Européenne¹². Cette libéralisation s'applique aux secteurs électrique et gazier. Il s'agit alors de dissocier les quatre fonctions (production, transport, distribution et fourniture), jusque-là assurées par un seul acteur, et d'organiser une mise en concurrence pour les fonctions de production et de fourniture. De nouveaux opérateurs énergétiques intègrent alors les secteurs de l'électricité et du gaz. Les fonctions de transport et de distribution sont séparées, mais sans mise en concurrence. La séparation des fonctions associées à la fourniture d'énergie n'a pas pour autant remis en cause la séparation stricte entre production et consommation qui préexistait. Le réseau de chaleur étant mis en œuvre à une échelle plus locale, il n'a pas été touché par la libéralisation et est resté géré dans son ensemble par un acteur unique.

En parallèle, les systèmes énergétiques basés sur les énergies renouvelables intermittentes, telles que le solaire ou l'éolien, ont été développés. Ces installations pouvaient être raccordées au réseau, ou non raccordées dans le cadre d'une autoconsommation directe¹³, comme c'est encore le cas aujourd'hui. **Il nous semble que c'est à partir de ce moment que la frontière entre production et consommation a commencé à évoluer.** En effet, il devient possible pour des consommateurs d'autoconsommer, i.e. de consommer leur propre énergie produite localement.

¹² DIRECTIVE 96/92/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 19 décembre 1996 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité. JO L 27 du 30/01/1997, p. 20–29.

DIRECTIVE 98/30/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 22 juin 1998 concernant des règles communes pour le marché intérieur du gaz naturel. JO L 204 du 21/07/1998, p. 1–12.

¹³ Nous n'avons pas trouvé d'information avant 2015 sur les installations non raccordées au réseau. Ceci s'explique par le fait que les données sur les installations d'énergies renouvelables intermittentes proviennent des demandes de raccordement auprès des gestionnaires réseaux de transport (RTE) et de distribution (ERDF, actuellement Enedis).

Cependant, les coûts élevés des systèmes énergétiques pour la production des énergies intermittentes ont tout d'abord limité leur déploiement. Fin 2000, la puissance raccordée en métropole, pour l'énergie éolienne, est de 39 MW (contre 16 574 MW fin 2019). Celle pour l'énergie photovoltaïque est de 3 MW (contre 9 483 MW fin 2019).

Le 10 février 2000, la loi relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité¹⁴ initie la mise en place d'un tarif d'obligation d'achat pour accompagner le développement des systèmes énergétiques basés sur les énergies renouvelables. L'énergie produite peut être revendue, à des tarifs fixés par l'État, à un fournisseur agréé. L'énergie produite peut être revendue en totalité ou après autoconsommation, on parle alors de revente du surplus. Selon Hespul, « ce mécanisme permet d'aboutir à une rentabilité normale des capitaux investis sur la durée de vie des installations »¹⁵. Les premiers décrets d'application sont publiés en juin 2001 pour l'éolien¹⁶ et en mars 2002 pour le photovoltaïque¹⁷. Le dimensionnement des installations est alors réalisé vis-à-vis de ces aides et moins vis-à-vis des besoins locaux en énergie.

Les graphiques ci-après, obtenus à partir des données Enedis¹⁸, permettent de mettre en évidence que la majorité des installations depuis 2009 ont été raccordées suivant le principe de l'injection totale. L'écart entre le nombre d'installations raccordées en injection totale et en injection du surplus est tel que nous supposons qu'il est possible d'extrapoler cet écart à la période 2000-2009. Ainsi, nous considérons que la majorité des installations entre 2000 et 2017 ont été raccordées en injection totale¹⁹. La gestion de l'énergie reste alors réalisée par les acteurs historiques. Nous expliquons ce choix

¹⁴ Loi n° 2000-108 du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité.

¹⁵ Hespul, page « Obligation d'achat », *Photovoltaïque.info*, avril 2020, consultée le 3 août 2020, <https://www.photovoltaïque.info/fr/tarifs-dachat-et-autoconsommation/tarifs-dachat/obligation-dachat-pv/>.

¹⁶ MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE, *arrêté du 8 juin 2001 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie mécanique du vent telles que visées à l'article 2 (2°) du décret n° 2000-1196 du 6 décembre 2000*, Journal officiel, n°143, 22 juin 2001.

¹⁷ MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE, *arrêté du 13 mars 2002 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie radiative du soleil telles que visées au 3° de l'article 2 du décret n° 2000-1196 du 6 décembre 2000*, Journal officiel, n°62, 14 mars 2002.

¹⁸ Enedis, page « Le Mix par Enedis », *Enedis*, consultée le 5 août 2020, <https://www.enedis.fr/open-data-le-mix-par-enedis>.

¹⁹ Hypothèse que nous n'avons pas pu vérifier à partir des données trouvées. En effet, assez peu de données sont disponibles avant 2009. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la première loi Grenelle,

par le coût économique important des installations et le faible prix de l'électricité, réduisant alors l'intérêt de l'autoconsommation et incitant à la vente du surplus.

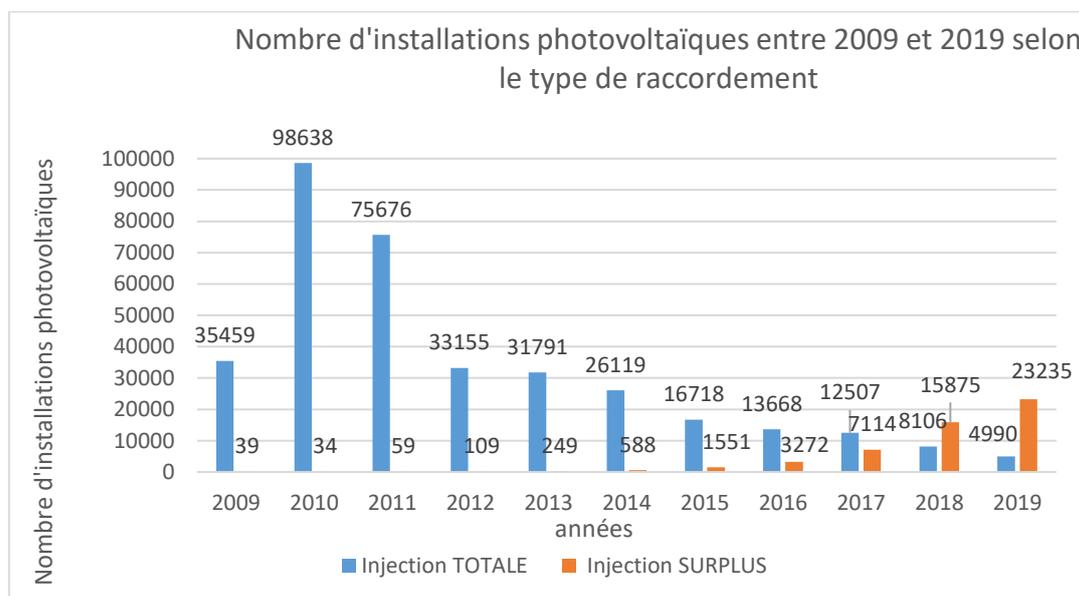


Figure 4 : Nombre d'installations photovoltaïques en fonction du type de raccordement | Source : Auteure, basée sur les données Enedis issues de la page « Le Mix par Enedis »

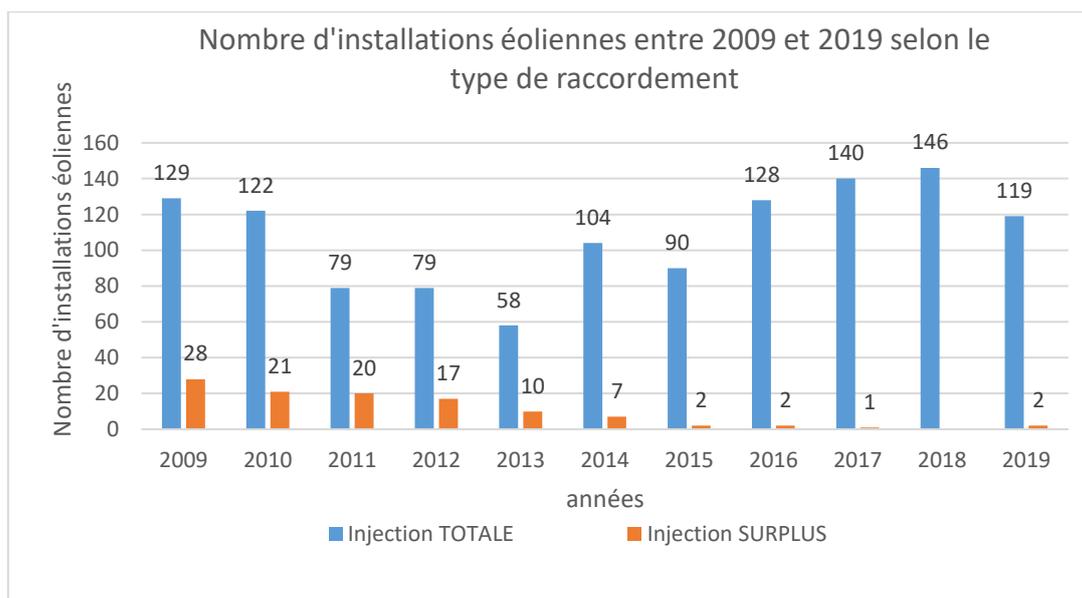


Figure 5 : Nombre d'installations éoliennes en fonction du type de raccordement | Source : Auteure, basée sur les données Enedis issues de la page « Le Mix par Enedis »

promulguée en 2009, indique un objectif chiffré pour le développement des énergies renouvelables, s'élevant à « au moins 23 % de sa consommation d'énergie finale d'ici à 2020 ». Il devient donc nécessaire de chiffrer le développement des énergies renouvelables sur le territoire français.

Nous distinguons plusieurs modèles de systèmes énergétiques intermittents raccordés au réseau. Un premier modèle correspond au développement de grandes centrales, telles que des champs d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques. Selon la taille, les centrales sont raccordées au réseau de transport (puissance supérieure à 12MW) ou au réseau de distribution (puissance inférieure à 12MW ou 17MW avec dérogation). Ces centrales de production intermittente suivent le modèle des grands systèmes énergétiques. Elles sont développées de manière centralisée par un acteur unique, majoritairement des opérateurs énergétiques historiques ou émergents (Duruiseau 2015), mais également des collectivités (via leur régie) (Boutaud 2016), elles sont de grande envergure et installées en zone peu dense (Shen, Qiu, et Dong 2018; Boutaud 2016, 244-47; Duruiseau 2016). Un deuxième modèle correspond au développement de « microcentrales » (entre 3 et 9 kWc²⁰), sur des petites toitures, porté majoritairement par des particuliers. Nous identifions un dernier modèle, intermédiaire et plus hétérogène, pour des grandes toitures. Ce modèle est majoritairement porté par des agriculteurs, des industriels, ou des collectivités. Pour les deux derniers modèles, les raccordements se font sur le réseau de distribution basse tension.

Ainsi, bien que l'introduction des systèmes énergétiques basés sur les énergies renouvelables et intermittentes ait permis aux acteurs historiquement consommateurs (particuliers, agriculteurs, industriels...) de produire par eux-mêmes de l'énergie via l'installation de panneaux photovoltaïques ou d'éoliennes, la majorité des installations sont raccordées en injection totale. Cela implique que, bien que la production d'électricité soit techniquement consommée au plus proche, la production d'énergie n'est pas pensée comme telle. En effet, dans le cadre des tarifs d'achat, le dimensionnement du système technique ne vise pas à répondre aux besoins locaux, mais à satisfaire les critères imposés pour bénéficier des tarifs d'achat. En outre, l'intermittence de la production d'énergie n'est finalement pas gérée par le producteur, mais par le fournisseur achetant l'énergie produite et fournissant de l'énergie selon les besoins.

Selon nous, la revente du surplus après autoconsommation est une seconde étape vers la redéfinition de la distinction forte entre consommation et production. En effet, le consommateur historique produit son électricité, qu'il consomme localement ; le terme de « consomm'acteur », ou *prosumer* en anglais désigne cette situation. Certains systèmes énergétiques intègrent des batteries individuelles, dont le coût est élevé, permettant une gestion locale de l'énergie. Cependant, cette

²⁰ L'unité kWc correspond à la puissance dite « nominale » d'un panneau photovoltaïque, qui est alors exposé à un rayonnement solaire de 1000 w/m². Selon EDF ENR, « il y a toujours un décalage (environ 15%) entre la puissance crête affichée et la puissance réelle des panneaux solaires, les conditions d'utilisation n'étant jamais optimales ».

EDF ENR, page « Définition kWc, puissance crête, puissance panneau solaire », *EDF ENR*, consultée le 13 septembre 2020, <https://www.edfenr.com/lexique/kwc/>.

autoconsommation reste à l'échelle individuelle, et les échanges d'électricités entre plusieurs consommateurs sont prohibés.

Ayant peu d'informations sur les installations non raccordées au réseau, nous n'en n'avons pas parlé dans les paragraphes précédents. Cependant, ces installations sont probablement celles qui remettent le plus en cause la dissociation forte entre production et consommation. Toutefois, la loi française ne permettant pas le développement de réseaux fermés, ces installations restent limitées à l'autoconsommation individuelle.

Concernant la chaleur, les lois Grenelle I²¹ de 2009 et Grenelle II²² de 2010 incitent à développer des centrales biomasses ou de la géothermie. Ces systèmes techniques restent cependant conçus et gérés par un unique acteur : le gestionnaire de chaleur local.

I.1.iii L'émergence des systèmes énergétiques locaux bas-carbone : un rapprochement entre production et consommation qui doit composer avec l'héritage d'une vision centralisée

On assiste aujourd'hui à une évolution de la relation entre production et consommation, qui est au cœur des projets que nous étudions dans cette thèse. Concernant l'électricité, cette évolution fait suite à la loi de transition énergétique pour la croissance verte (TEPCV) promulguée en 2015²³, et plus précisément à l'ordonnance promulguée en juillet 2016²⁴. **L'ordonnance introduit le droit à l'autoconsommation collective définie comme suit : « l'opération d'autoconsommation est collective lorsque la fourniture d'électricité est effectuée entre un ou plusieurs producteurs et un ou plusieurs consommateurs finals liés entre eux au sein d'une personne morale et dont les points de soutirage et d'injection sont situés sur une même antenne basse tension du réseau public de distribution »**. Cette ordonnance est ratifiée par une loi promulguée en février 2017²⁵, puis des décrets²⁶ sont venus redéfinir notamment le cadre géographique de l'autoconsommation (cf. V.2.i.a).

²¹ *Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement.*

²² *Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement.*

²³ *Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.*

²⁴ *Ordonnance n° 2016-1019 du 27 juillet 2016 relative à l'autoconsommation d'électricité.*

²⁵ *Loi n° 2017-227 du 24 février 2017 ratifiant les ordonnances n° 2016-1019 du 27 juillet 2016 relative à l'autoconsommation d'électricité et n° 2016-1059 du 3 août 2016 relative à la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables et visant à adapter certaines dispositions relatives aux réseaux d'électricité et de gaz et aux énergies renouvelables - Article 9.*

²⁶ *MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER, CHARGÉ DES RELATIONS INTERNATIONALES SUR LE CLIMAT, Décret n° 2017-676 du 28 avril 2017 relatif*

Des échanges locaux d'électricité entre un ou plusieurs producteurs et un ou plusieurs consommateurs sont alors autorisés sous la condition de réaliser ces échanges via le réseau public de distribution. Par ailleurs **l'ordonnance relative aux réseaux fermés de distribution, promulguée en décembre 2016²⁷, autorise le développement de « réseau(x) de distribution qui achemine(nt) de l'électricité à l'intérieur d'un site géographiquement limité et qui alimente un ou plusieurs consommateurs non résidentiels exerçant des activités de nature industrielle, commerciale ou de partages de services ».** Le réseau fermé « doit remplir l'une des deux conditions suivantes :

- **l'intégration dans ce réseau des opérations ou du processus de production des utilisateurs est justifiée par des raisons spécifiques ayant trait à leur technique ou à leur sécurité ;**
- ce réseau distribue de l'électricité essentiellement au propriétaire ou au gestionnaire de réseau ou à des entreprises qui leur sont liées au sens de l'article L. 233-3 du code de commerce ».

Une production locale et des échanges locaux sont donc également possibles, sous conditions. Dans les deux cas, la capacité à échanger de l'énergie a fait disparaître la distinction entre les fonctions de production et de consommation, voire entre les fonctions de fourniture et de consommation, qui peuvent alors être portées par un même acteur.

Concernant le gaz, des méthaniseurs sont envisagés localement, possiblement alimentés par un ou plusieurs agriculteurs, pour la production de biogaz, afin de le réinjecter dans un réseau gazier. Ainsi, de nouveaux acteurs intègrent le processus de production de gaz, qui jusqu'alors se basait sur des ressources fossiles et était géré par les opérateurs énergétiques historiques.

Concernant la chaleur, certaines mesures faisant suite aux lois Grenelle I²⁸ de 2009 et Grenelle II²⁹ de 2010 incitent les gestionnaires de réseau à se tourner vers des industriels producteurs de chaleur « fatale » présents sur leur territoire pour injecter cette chaleur dans le réseau de chaleur urbain. En effet, si le mix énergétique du réseau est alimenté à plus de 50 % en énergies renouvelables ou de récupération, la TVA sur l'abonnement de la fourniture d'énergie est réduite à 5,5 % au lieu de 20 %. La valorisation de chaleur permet d'augmenter le taux d'énergies renouvelables et de récupération.

à l'autoconsommation d'électricité et modifiant les articles D. 314-15 et D. 314-23 à D. 314-25 du code de l'énergie, Journal officiel, n°0102, 30 avril 2017.

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE, *arrêté du 21 novembre 2019 fixant le critère de proximité géographique de l'autoconsommation collective étendue, Journal officiel, n°0273, 24 novembre 2019.*

²⁷ *Ordonnance n° 2016-1725 du 15 décembre 2016 relative aux réseaux fermés de distribution.*

²⁸ *Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement.*

²⁹ *Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement.*

Le développement de ces projets est également fortement soutenu financièrement via le Fond chaleur de l'ADEME issu des lois Grenelle. Ainsi, des industriels sont petit à petit amenés à devenir producteurs de chaleur pour les réseaux de chaleurs urbains. Bien que la transformation de la relation entre production et consommation soit moins aboutie que pour l'électricité, cette évolution introduit de nouveaux acteurs dans la production de chaleur qui restait jusqu'à présent gérée par un unique acteur.

Pour les trois vecteurs électriques, on peut noter une localisation des SELBC proches des réseaux de distribution existants afin de limiter les coûts et le temps de construction. Dans le cas de l'électricité, les faibles puissances amènent à se raccorder au réseau de distribution, et non au réseau de transport d'électricité. En plus d'une proximité avec les réseaux de distribution, les SELBC sont également conçus à proximité des unités de consommations ou, dans le cadre de la récupération de chaleur, proches des équipements industriels pour des raisons techniques (limiter les pertes) ou réglementaires. **Ainsi, les SELBC sont développés en zones habitées denses, proche de la consommation, nécessitant de s'adapter aux contraintes locales.**

Les exemples introduits dans les paragraphes précédents pour l'électricité, la chaleur ou encore le gaz, présentent un développement de systèmes énergétiques portés par des acteurs du territoire historiquement « consommateurs ». On observe une remise en cause de la distinction historique entre production et consommation depuis quelques années, voire entre fourniture et consommation, plus récemment avec l'ordonnance sur l'autoconsommation collective, puisque les « consommateurs historiques » sont amenés à assurer les échanges d'énergie. **Cependant, le fonctionnement des systèmes électriques et gaziers reste très formaté par la vision centralisée qui les a précédés. Il en est de même pour les réseaux de chaleur, bien que ce soit à une échelle plus réduite³⁰.**

³⁰ En reprenant les réflexions de l'historien Jean-Pierre Williot (Beltran et Frankreich 2009), (Boutaud 2016) rappelle les trois points principaux du modèle centralisé qui fondent encore aujourd'hui l'organisation du système énergétique français :

- « Le contrôle exercé par l'État, en charge du bien commun, affirmé à travers de grands choix stratégiques (repli charbonnier, construction de raffineries, plan MESSMER » visant le développement des centrales nucléaires).
- La recherche « d'une sécurité globale d'approvisionnement durable » impliquant la possible « intervention de l'État ».
- La mise « en œuvre (de) l'égalité de traitement des usagers », qui s'exprime notamment par le principe du « timbre-poste » consistant à payer les mêmes tarifs et taxes pour tout consommateur en France, peu importe le lieu de consommation, le réseau utilisé, la distance parcourue...

Ces trois caractéristiques sont également présentes pour les réseaux de chaleur, même si elles s'appliquent à une échelle plus réduite : celle d'une collectivité locale. La mise en œuvre de l'égalité dans le traitement des usagers est également prise en compte dans le calcul des tarifs à payer par les usagers.

1.2 Caractéristiques techniques des SELBC et modalités de fonctionnement à l'origine d'enjeux « socio-techniques »

La partie précédente retrace l'émergence des systèmes énergétiques locaux bas-carbone. Cette deuxième partie vise à définir les SELBC de manière plus précise, notamment en les décrivant par leurs caractéristiques techniques. Pour identifier ces caractéristiques, nous nous sommes appuyée sur des analyses de projets énergétiques que nous considérons comme des SELBC ou proches de ces derniers (cf. V.2.i.a et V.2.iii). Ces analyses sont issues de projets de recherche menés en urbanisme et en aménagement du territoire. Nous distinguons deux grands types de caractéristiques : celles qui sont communes à tout SELBC (intermittence, connexion au réseau, etc.) (1.2.i), et celles qui sont spécifiques aux ressources mobilisées ou au contexte de conception (surface de captation importante, prise en compte de l'espace urbanisé existant, etc.) (1.2.ii). Au-delà de ces caractéristiques techniques, des modalités de fonctionnement particulières de ces SELBC peuvent être mises en évidence : la flexibilité, qui amène les unités de production ou de consommation considérées historiquement comme fixes à devenir flexibles, ainsi que la sobriété recherchée dans une perspective d'énergie bas-carbone (1.2.iii). Le point de vue des acteurs vis-à-vis de ces caractéristiques, présentés dans les encadrés, nous a amenée à mettre en évidence l'imbrication entre systèmes techniques et acteurs du projet révélant le caractère socio-technique des SELBC (1.2.iv).

1.2.i Caractéristiques communes liées au SELBC

Cette sous-partie présente les caractéristiques communes des SELBC. Les premières caractéristiques abordées sont liées à la ressource énergétique mobilisée : partant de la définition des SELBC celle-ci doit être locale (1.2.i.a) et intermittente (1.2.i.b). Les autres caractéristiques sont liées aux échanges. La notion d'échanges implique que les SELBC sont *a minima* multiconsommateurs et possiblement multiproducteurs (1.2.i.c), et qu'ils nécessitent une connexion à un réseau de distribution (1.2.i.d). Par ailleurs, une dépendance entre production et consommation se crée (1.2.i.e), et la prise en compte de plusieurs consommateurs permet de bénéficier de foisonnement (1.2.i.f).

1.2.i.a Ressource locale

Les SELBC sont par définition des systèmes énergétiques de capture et d'échanges *in situ* d'énergie renouvelable intermittente ou de récupération. La caractéristique *in situ* entraîne une production à proximité de la consommation. Comme le montre l'Encadré 1, la possibilité de produire localement entraîne chez certains consommateurs le souhait de produire localement leur propre énergie, devenant alors producteur-consommateur ou *prosumer*.

Encadré 1 : Le souhaite d'une production d'énergie locale : exemple avec le projet des Colibres

Le projet des Colibres est un projet d'habitat participatif étudié par (Aubert 2020) dans le cadre de sa thèse. La possibilité de produire localement l'énergie qu'il consomme, voire au plus proche du lieu de consommation, est une caractéristique importante pour ce collectif. Ainsi, (Aubert 2020, 204) explique que « la première étape vers l'autonomie énergétique consiste à concevoir un habitat très basse consommation. Ensuite, l'objectif est de produire l'énergie restante nécessaire au maximum sur place. » Elle ajoute plus loin dans sa thèse que « dans une logique quasi-militante, les Colibres souhaitent, dès le début, une autoconsommation directe d'électricité renouvelable, au plus près du lieu de production » (Aubert 2020, 297).

I.2.i.b Ressource intermittente

Les SELBC dépendent des ressources disponibles sur le site de leur implantation. Ces ressources sont majoritairement intermittentes et sont considérées comme des énergies de flux, variant de la minute (solaire, vent) à la saison (hydraulique). Il en est de même dans le cas de la récupération de chaleur, car la chaleur fatale découle du fonctionnement du site « industriel » qui la produit. L'intermittence peut également être présente dans le cadre de la production de biogaz issue de déchets agricoles : la production de déchet peut évoluer selon les périodes de récolte ou selon la présence, ou non, des animaux en intérieur. Cette caractéristique nous amène cependant à ne pas considérer les systèmes énergétiques basés sur de la géothermie ou du bois coupé et transporté comme des SELBC. L'intermittence est un enjeu qui ne se posait pas avec les énergies fossiles, considérées comme des énergies de stock, et mobilisables selon les besoins de consommation.

I.2.i.c Multiconsommateur et possiblement multiproducteur : de l'échelle multilogement à l'échelle quartier

La notion d'échanges d'énergie implique que le SELBC est multiconsommateur. Plusieurs lieux de consommation sont alors à envisager. Le système énergétique dépasse alors l'échelle d'une maison (échelle associée à l'autoconsommation individuelle d'énergie) pour une échelle multilogement, multibâtiment ou encore de quartier. Le projet peut également être multiproducteur avec un ou plusieurs lieux de production. Ainsi, l'échelle n'est pas fixe pour l'ensemble des SELBC : elle est à définir par les acteurs du projet. Les Figure 6 et Figure 7 ci-dessous montrent l'étendue possible des SELBC sur deux exemples : un projet de valorisation de chaleur et un projet d'autoconsommation collective électrique.

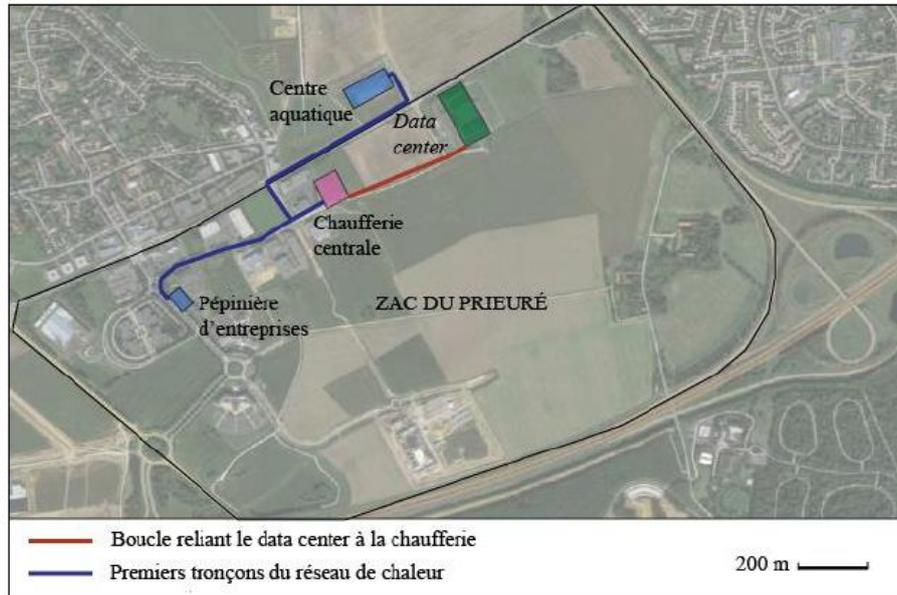


Figure 6 : Représentation spatiale des premiers développements du réseau de chaleur du projet de valorisation de chaleur au Val d'Europe | Source : (Hampikian 2017, 215) à parti d'un fond Google Earth (16/05/2016)



Figure 7 : Représentation spatialisée du projet d'autoconsommation collective à Marmagne | Source : (Aubert 2020, 186)

I.2.i.d Connexion à un réseau de distribution

Pour assurer la distribution des lieux de production aux lieux de consommation, les SELBC sont raccordés à un réseau d'énergie (électricité, chaleur ou gaz), comme représenté sur les deux figures précédentes. Il peut s'agir de réseaux de distribution privés ou publics, selon le cadre réglementaire et le contexte local. Dans le cadre de l'électricité et du gaz en France, il s'agit principalement du réseau

public de distribution. L'ordonnance de 2016 relative aux réseaux fermés de distribution d'électricité³¹ permet néanmoins l'existence de réseaux dits fermés pour des consommateurs non résidentiels exerçant des activités de nature industrielle, commerciale ou de partages de services. Dans le cadre de la chaleur, les réseaux de chaleur urbains sont majoritairement publics, quelques réseaux privés existent néanmoins en accord avec les communes et l'autorité en charge de l'aménagement de l'espace. Le réseau peut être considéré comme faisant partie du SELBC mais il ne l'est souvent qu'en partie, car les échanges étant locaux, l'ensemble du réseau n'a pas vocation à être intégré. A l'instar des projets énergétiques « classiques » cette connexion au réseau nécessite de travailler avec le gestionnaire du réseau par lequel l'énergie transite. L'Encadré 2 présente, via deux exemples de projets d'autoconsommation collective électrique, l'obligation de travailler avec le gestionnaire de réseau. Les projets de récupération de chaleur que nous avons rencontrés impliquent également un gestionnaire de chaleur.

Encadré 2 : Une obligation de travailler avec le gestionnaire réseau : exemple des projets d'autoconsommation collective

Dans sa thèse, (Aubert 2020, 191) met en évidence le rôle obligé du gestionnaire réseau pour les projets d'autoconsommation collective électrique. Cette obligation est mise en évidence par les acteurs dans le cadre du projet SmartMagne et dans le cadre du projet des Colibres. Comme le montre la citation suivante, Aubert explique que cette obligation est imposée par la réglementation française. « Pour l'autoconsommation simple et collective, la loi indique qu'Enedis est chargé d'un certain nombre de missions dans de telles opérations, au-delà de son rôle classique de gestionnaire du réseau de distribution électrique. La participation d'Enedis à un projet d'autoconsommation collective tel que Smartmagne (et Les Colibres) est donc décidée par la loi, d'où la notion d'acteur « *contraint* » employée par le directeur général du SDE18. On observe ici que cette contrainte est spécifique à la France. À Saerbeck, la commune a pu décider de faire sortir RWE du cercle des acteurs et a créé sa propre filiale pour pouvoir décider par elle-même des conditions de gestion du réseau de distribution ».

I.2.i.e Interdépendance entre production et consommation

Les échanges locaux d'énergie créent une interdépendance entre la (ou les) unité(s) de production et la (ou les) unité(s) de consommation. Pour l'électricité, l'équilibre production-consommation doit être respecté à chaque instant. Pour la chaleur et pour le gaz, l'inertie du système est plus importante. Cette interdépendance est renforcée si le SELBC est la source de production principale, voire unique. Dans le cas où les acteurs locaux de la production sont différents de ceux de la consommation, cela crée une interdépendance entre ces acteurs, que ce soit sur le court terme ou sur le long terme. L'Encadré 3 présente un exemple de dépendance de la consommation vis-à-vis de la production sur le

³¹ Ordonnance n° 2016-1725 du 15 décembre 2016 relative aux réseaux fermés de distribution.

long terme. Quant à l'Encadré 4, il s'agit d'un exemple d'impact de la consommation sur la production. Cette interdépendance existe déjà pour les projets énergétiques plus « classiques » pour lesquels les acteurs travaillent à la limiter. Dans le cas des SELBC, l'intermittence et le nombre réduit de consommateurs et/ou de producteurs peuvent exacerber les effets de cette interdépendance.

Encadré 3 : Interdépendance entre production et consommation : exemple avec le projet de valorisation de chaleur fatale à Dunkerque

L'interdépendance entre production et consommation est explicitée dans le cadre du projet de valorisation de chaleur d'ArcelorMittal à Dunkerque, dont l'apport représente 60 % de l'énergie du réseau (Hampikian 2017). En effet, les acteurs s'inquiètent de cette dépendance vis-à-vis de l'approvisionnement des consommateurs, comme le montre l'extrait suivant issu d'un entretien avec le directeur du service énergie de la ville de Dunkerque : « *L'industriel qui représente le fournisseur d'énergie, 60%, c'est Arcelor. Demain il ferme, on fait quoi ? On fait quoi ? Et demain, il peut fermer du jour au lendemain. Enfin il y aura les plans sociaux, mais ça dure quoi ? Et même si ça dure une année, il n'y aura plus de production. Donc nous, on n'aura pas de récupération d'énergie* » (Entretien avec le directeur du service énergie de la ville de Dunkerque – 15/04/2015) (Hampikian 2017, 159).

Encadré 4 : Incidence de la consommation sur la production : exemple avec le projet de valorisation de chaleur fatale au Val d'Europe

L'interdépendance entre production et consommation est présentée dans le cadre du projet de valorisation de chaleur d'un data center au Val d'Europe (Hampikian 2017). Il s'agit d'un réseau de chaleur privé reliant un data center à plusieurs consommateurs, dont notamment une piscine. Le réseau a été conçu comme surdimensionné par rapport aux consommations initiales. En effet, une augmentation de la production de chaleur est prévue par le raccordement de nouvelles tranches du data center et une augmentation des consommations est également prévue suite à de nouvelles installations sur la zone. La citation suivante présente un exemple où la consommation impacte la production : « *Les réactions du réseau ne sont pas les mêmes à faible puissance qu'elles le seraient avec une consommation régulière. Aujourd'hui on est très impactés entre autre par des gros consommateurs actuels [...], c'est la piscine qui nous impacte sur le fonctionnement et sur les méthodes de fonctionnement. On doit fonctionner en dents de scie. Alors que le fonctionnement à l'initial avait été imaginé beaucoup plus lisse, beaucoup plus constant* » (Entretien avec le responsable des travaux de la banque, 10/12/2014) (Hampikian 2017, 221).

I.2.i.f Bénéficiaire du foisonnement

Le fait d'intégrer plusieurs consommateurs permet de bénéficier de l'effet de foisonnement qui revient à lisser la courbe de charge en intégrant des profils de consommation différents (cf. Figure 8 ci-dessous). Le Cerema définit, pour la chaleur, le foisonnement comme « le phénomène par lequel la demande de chaleur d'un quartier est lissée, du fait du caractère asynchrone des besoins des différents

bâtiments. Il permet de mieux mutualiser l'investissement dans les équipements de production de chaleur »³². Il en est de même pour l'électricité. Le foisonnement peut être plus ou moins important selon la ressource énergétique utilisée. Le foisonnement peut permettre de limiter un surdimensionnement du système technique, diminuant ainsi les coûts et les pertes liées.

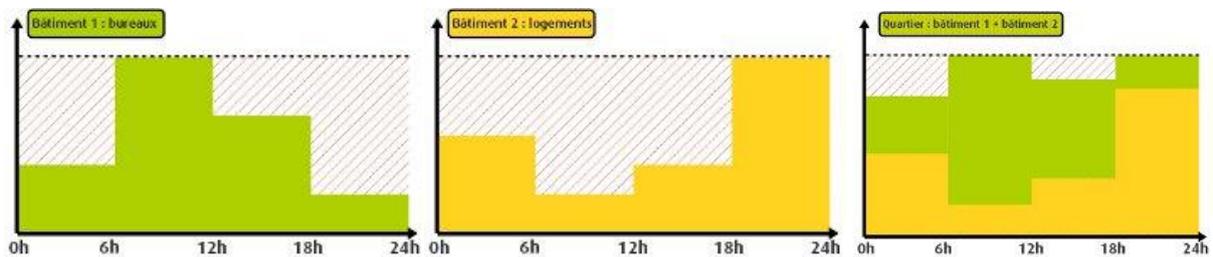


Figure 8 : Représentation graphique du principe de foisonnement | Source : Cerema, page « Foisonnement - Réseaux de chaleur et territoires »

Dans le cadre d'une production intermittente, ce principe permet surtout d'assurer une consommation au moment où il y a de la production, comme le rappelle l'Encadré 5. Le choix des consommateurs et des profils de consommation associés, ainsi que le choix de la ressource et de son intermittence, sont donc à prendre en compte dès la phase de conception.

Encadré 5 : Assurer une consommation au moment où il y a de la production : exemple avec le projet des Colibres

(Aubert 2020) indique que le projet des Colibres envisage à un moment de l'autoconsommation individuelle. Cependant, cette solution est écartée, notamment parce qu'elle ne permet pas de bénéficier collectivement du foisonnement. Ainsi (Aubert 2020, 299) explique que « la première option était de connecter chaque banc de [panneaux photovoltaïques] à chaque habitation, qui pourrait ainsi faire de l'autoconsommation individuelle. Deux problèmes [sont considérés]. (...) Le second problème, d'ordre technico-économique, est que cela empêche le foisonnement : « si je ne suis pas là le week-end et que mon chauffe-eau est plein, je gâche de l'électricité produite » (Entretien avec Colibre 1 - 18/04/18).

I.2.ii Caractéristiques spécifiques aux ressources ou au contexte et contraignantes

Cette deuxième sous-partie présente des caractéristiques spécifiques aux ressources ou au contexte rencontrés dans le cadre de notre analyse des SELBC. Nous avons choisi de mettre en évidence uniquement des caractéristiques contraignantes qui peuvent complexifier la conception des SELBC. Les premières caractéristiques sont liées à la ressource énergétique mobilisée : une surface de

³² Cerema, page « Foisonnement - Réseaux de chaleur et territoires », *Réseaux de chaleur et territoires*, février 2012, consultée en avril 2020, <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/foisonnement>.

captation importante pour les énergies renouvelables intermittentes (I.2.ii.a), une faible production liée à la conception des SELBC au sein d'espaces urbanisés existants (I.2.ii.b), ou encore une production issue de la valorisation de chaleur fatale pas toujours adaptée à la consommation (I.2.ii.c). D'autres caractéristiques sont liées aux échanges et notamment la dépendance matérielle entre les parties prenantes créée par la mutualisation des systèmes énergétiques (I.2.ii.d).

I.2.ii.a Surface de captation importante

La surface de captation des ressources solaire et éolienne pour la production d'électricité est importante. En effet, comme le présente la Figure 9, il faut environ 10 m² de panneaux photovoltaïques ou une éolienne de 5m de diamètre pour produire 1 kWh en 1 h considérant une période ensoleillée (pour le photovoltaïque) ou venteuse (pour l'éolien). Pour donner un ordre de grandeur, 1 kWh correspond à la consommation électrique ³³ :

- d'un four pendant 1 h, ou
- de trois ordinateurs portables pendant une demi-journée, ou
- d'une télévision entre 3 et 5 h selon ses caractéristiques, ou
- à un cycle de lavage du linge, ou encore
- à 2 km avec un Smart électrique...

Cependant, 1 kWh ne suffit pas pour prendre une douche (2 kWh) ou un bain (4 kWh) ou encore pour couvrir de nombreux besoins industriels.



* Sous conditions climatiques moyennes en France

Figure 9 : Surface de captation nécessaire pour produire 1 kWh pendant 1 h | Source : Adapté de Avenir Climatique

I.2.ii.b Conception de SELBC inscrite dans de l'existant : des contraintes limitant la production

Le développement d'une partie des SELBC s'inscrit souvent dans des espaces urbanisés existants. L'espace dédié à la production énergétique est donc limité par les installations déjà existantes, comme par exemple la place disponible sur les toits dans le cadre d'un système photovoltaïque. Dans le cadre de la chaleur fatale, la récupération d'énergie est également limitée au dimensionnement, souvent

³³ EDF, page « Que peut-on faire avec 1 kWh ? », *EDF France*, 20 juillet 2015, consultée en avril 2020, <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/que-peut-on-faire-avec-1-kwh>.

préexistant, des installations industrielles. La capacité de production se trouve donc également limitée par l'existant. Par ailleurs, des réglementations locales, comme des plans locaux d'urbanisme (PLU), peuvent interdire certains systèmes techniques pour des raisons d'architecture, d'emprise au sol, etc. L'Encadré 6 fait référence à ces limites dans le cadre de projets photovoltaïques.

Encadré 6 : Conception des SELBC au sein d'espaces urbanisés existants : exemple de projets photovoltaïques

Dans sa thèse, (Aubert 2020) étudie cinq SELBC basés sur de la production photovoltaïque qui sont majoritairement développés au sein d'espaces urbanisés existants. Ainsi « quatre des cinq assemblages étudiés sont des projets sur de l'existant ». L'auteure met en évidence la capacité de ce type de système énergétique à s'adapter à l'existant. Ainsi, elle explique que « les modifications spatiales [...] observ[ées] sont mineures : ni la trame urbaine, ni la forme du bâti ne sont modifiés. [...] Les moyens de production sont en grande majorité des panneaux solaires intégrés à la pente du toit, ou intégrés au bâti (les Colibres) ».

(Aubert 2020) met par ailleurs en évidence l'intérêt d'un unique acteur pour la production et la consommation. Ainsi, l'auteure explique que « le premier critère identifié pour assurer l'absence de contraintes est la parcelle privée et l'unicité du propriétaire. [...] Le producteur et le consommateur sont la même personne. [...] A partir de cette propriété unique, chacun des cas [étudiés] montre que les dispositifs réglementant l'utilisation de cette propriété, dispositif de la fabrique urbaine ordinaire, ne sont pas contraignants pour l'installation de moyens de production d'énergie appartenant au propriétaire de la parcelle visée pour l'installation ».

Au-delà de la prise en compte de la matérialité et de la propriété il est également nécessaire de prendre en compte le contexte local. Citant (MORONI et al. 2019), l'auteure présente les plans et codes urbains comme des « frein(s) au développement des infrastructures de production d'EnR de petite taille ». L'auteure explique cependant que les projets étudiés ne sont pas concernés, car « les acteurs [...] ont spécifiquement choisi ce type de lieux [pour lesquels les matériels installés sont peu pris en compte par des réglementations d'urbanisme ; principalement pour des raisons de taille (technique et spatiale) des systèmes, de droit urbain de la propriété privée et du contexte urbanisé] ».

I.2.ii.c La production issue de la valorisation de chaleur fatale n'est pas toujours adaptée à la consommation : une question de température

Pour la valorisation de chaleur, la chaleur collectée ne correspond pas toujours aux besoins des consommateurs. Par exemple, plus la température de la chaleur est basse, plus il est actuellement difficile de la valoriser, car la majorité des installations de chauffage actuelles nécessitent des températures supérieures à 100°C, possiblement 60°C pour les quartiers « basse consommation ». Par ailleurs, comme le présente l'Encadré 7, certains acteurs ont besoin de chaud, mais également de froid, qu'il n'est pas toujours possible de produire avec de la valorisation de chaleur fatale.

Encadré 7 : La production issue de la valorisation de chaleur fatale n'est pas toujours adaptée : exemple avec le projet de valorisation de chaleur fatale au Val d'Europe

(Hampikian 2017, 220) met en évidence, via le projet de valorisation de chaleur du Val d'Europe, l'importance pour certains acteurs de bénéficier de froid, ce qui n'est pas toujours possible dans le cas d'un projet de valorisation de chaleur fatale. Elle cite ainsi un ancien chargé de développement immobilier chez Disney expliquant pourquoi la solution de connexion au réseau de chaleur n'est pas retenue : « *si j'étais promoteur, on est sur un marché immobilier un peu tendu en termes de commercialisation, donc effectivement, retirer une prestation nécessaire aux utilisateurs qui est le froid, c'est dommageable pour un promoteur* » (Entretien avec un ancien chargé de développement immobilier chez Disney - 03/11/2014). En effet, le réseau de chaleur se base sur de la récupération de chaleur du data center (55°C) et ne produit pas de froid.

I.2.ii.d Mutualisation du système technique ou d'une partie : de nouvelles dépendances

Dans le cadre des systèmes énergétiques, mutualiser consiste à mettre en commun ou à partager, entre plusieurs acteurs, une partie ou la totalité du système technique. Dans le cadre de projets d'échanges d'énergie, il semble que la mutualisation soit plus facilement envisagée. La mutualisation des systèmes énergétiques peut être vue comme un avantage pour limiter le dimensionnement du système, maximiser son efficacité, ou encore répartir les coûts d'investissement et de fonctionnement... Cependant, cela peut complexifier le projet comme le montre l'Encadré 8 et l'Encadré 9. En effet, la mutualisation des systèmes crée de nouvelles dépendances entre ces acteurs.

Encadré 8 : Mutualisation du système technique et difficulté d'accès aux installations : exemple avec le projet de valorisation de chaleur fatale à Dunkerque

Dans le cadre du projet de valorisation de chaleur de l'entreprise ArcelorMittal à Dunkerque étudié par (Hampikian 2017), les questions liées à la mutualisation des systèmes techniques dépassent les enjeux techniques. L'auteure explique dans sa thèse que le système de valorisation de chaleur est localisé sur le site de l'usine, qu'il est la propriété de la ville, et qu'il est géré par l'exploitant du réseau de chaleur sous Délégation de Service Public. Le système technique de récupération de chaleur est alors mutualisé entre ces trois acteurs. Cette configuration entraîne un problème dans le fonctionnement de la maintenance. Ce problème est apparu au cours de la gestion du système. En effet, situé au sein de l'usine ArcelorMittal, le système de valorisation n'est pas directement accessible au gestionnaire de chaleur. Les exploitants du réseau de chaleur doivent donc suivre régulièrement des formations de sécurité pour pouvoir accéder au site et faire la maintenance du système, sans quoi la maintenance ne peut être faite. (Hampikian 2017, 148) cite alors le responsable de l'exploitation du réseau présentant ce problème « *pour rentrer à Arcelor, faut qu'on ait des accès, mais avec ces accès on doit faire une ... tous les ... maintenant c'est trois ans ou deux ans, une formation accueil sécurité Arcelor. Si on n'a pas fait ça, eh ben voilà, j'ai un collègue en plus qui ne peut plus aller sur le site ...* » (Entretien avec le responsable de l'exploitation du réseau – EGL – 03/02/2015).

Encadré 9 : Mutualisation du système technique et questions de propriété : exemple avec le projet de valorisation de chaleur fatale à Dunkerque

Les systèmes techniques de récupération de chaleur de l'entreprise ArcelorMittal sont mutualisés entre le producteur de chaleur, la ville qui en est propriétaire et l'exploitant du réseau de chaleur qui en assure la gestion. La question de la propriété des systèmes de récupération de chaleur est un enjeu important pour les acteurs du projet, mis en évidence par (Hampikian 2017). En effet, si la ville abandonne le projet et retire le système de récupération de chaleur dont elle est propriétaire, l'industriel ne peut plus faire fonctionner ses machines, car le système technique de valorisation sert également de protection anti-poussière. Dans le cas inverse, si l'industriel n'utilise plus la machine, la production de chaleur ne sera plus suffisante pour répondre à la demande, la ville devra donc investir dans de nouvelles installations tout en continuant de rembourser les investissements restants. Pour avancer dans le projet, les acteurs prévoient, dès la conception du projet, un transfert de propriété du système de valorisation de chaleur en fonction de l'acteur arrêtant la collaboration. Ainsi, si la ville abandonne le projet, elle cède « pour l'euro symbolique l'intégralité des installations nécessaires au fonctionnement autonome de nos propres installations de récupération de poussières » et, si l'industriel abandonne le projet, « l'industriel s'engage en retour à rembourser l'ensemble des investissements restant non amortis en cas d'abandon de la chaîne d'agglomération n°2 » (Hampikian 2017, 147).

I.2.iii Modalités de fonctionnement

Au-delà des caractéristiques techniques présentées précédemment, deux modalités de fonctionnement, permettant de répondre notamment à l'intermittence des SELBC, peuvent être mises en évidence : la flexibilité (I.2.iii.a) et la sobriété (I.2.iii.b). Nous présentons succinctement ces modalités de fonctionnement, dans les sections suivantes, en visant à mettre en évidence l'intérêt ou l'enjeu pour les SELBC.

I.2.iii.a Flexibilité de la consommation et de la production : valoriser la flexibilité des acteurs

Nous définissons la flexibilité comme la capacité à « gérer de manière fiable la variabilité et l'incertitude de la demande et de l'offre, quelle que soit l'échelle temporelle » (Pajot 2019). Pour les SELBC nous identifions trois modes de flexibilité : la flexibilité de la consommation, la flexibilité de la production, la flexibilité liée au stockage. Ne pas bénéficier de la flexibilité des acteurs implique un surdimensionnement des systèmes de production, des systèmes de consommation, du réseau, ou encore le recours à des systèmes de stockage. **C'est pourquoi il est nécessaire de prendre en compte les flexibilités possibles dès la phase de conception.** Cependant, cela pouvant avoir un impact sur les activités, il est nécessaire que **les sources de flexibilité et leur mise en pratique soient discutées entre les parties prenantes.**

Flexibilité de la consommation

Intéressons-nous dans un premier temps à la flexibilité vis-à-vis de la consommation. Jusqu'à présent la consommation était considérée comme une charge non contrôlable que la production devait combler. Aujourd'hui, la flexibilité des consommateurs est de plus en plus envisagée à l'échelle d'une unité de vie, d'un bâtiment ou encore à l'échelle industrielle. La flexibilité peut être réalisée de manière directe par les consommateurs, s'ils décident de couper ou limiter leurs consommations. La consommation directe peut être assez contraignante, car le consommateur doit pouvoir moduler sa consommation au moment opportun, comme le présente l'Encadré 10. Le développement des objets connectés simplifie tout de même la démarche. Actuellement, des travaux de recherche, notamment le programme Expésigno³⁴, sont en cours pour tester la flexibilité auprès de particuliers à travers des Nuges, qui sont des messages (textes, graphismes, objets...) d'incitation pour amener les personnes à réaliser une action, par rapport aux contraintes du réseau. La flexibilité peut être également gérée de manière indirecte via des systèmes automatisés coupant ou limitant les consommations. Pour une flexibilité indirecte, la commande peut être envoyée par un acteur autre que le consommateur.

Encadré 10 : Consommateurs et flexibilité directe : exemple avec un projet d'autoconsommation collective

Les membres d'un projet d'autoconsommation collective, étudié dans le cadre du projet de recherche Eco-SESA, s'interrogent sur la flexibilité liée à leurs consommations, dont ils disposent. Selon un membre, leur flexibilité est limitée. Deux raisons peuvent être mises en évidence : il n'y a pas beaucoup de consommation en journée et des impératifs peuvent prévaloir sur cette flexibilité. Ainsi il explique dans un entretien : « *Mais c'est sûr que pour moi, il n'y aura pas grande chose, parce qu'en journée, il n'y a pas grande chose. C'est vrai que quelque fois, quand j'allume le four, je me dis : tiens non il est 16h, je dois plutôt faire marcher le four maintenant qu'à 20h tu vois. Donc oui quelque fois il y a des réflexes comme ça* » (Entretien avec un membre d'un projet d'autoconsommation collective – 16/05/2018). Dans un autre entretien il considère d'autres appareils, les machines à laver : « *Voilà, autant autoconsommer. Par exemple, ça veut dire que la buanderie où il y a 4 machines à linge, c'est les faire tourner en journée, si c'est en début de journée pas en faire tourner deux en même temps mais attendre un peu plus de temps, quoi. Effectivement pour les périodes les plus ensoleillées, c'est là où on aura le plus de production. Mais voilà on va sensibiliser. Donc les gens sont déjà pas mal sensibilisés. Après, il y a toujours des impératifs l'hiver, là où tu ne peux pas attendre midi pour faire tourner ta machine...* » (Entretien avec un membre d'un projet d'autoconsommation collective – 16/05/2018).

³⁴ G2Elab, page « EXPESIGNO », consultée en février 2020, <https://g2elab.grenoble-inp.fr/fr/recherche/expesigno-experimentation-de-la-reactivite-des-menages-aux-signaux-des-operateurs-des-systemes-energetiques>.

Des mécanismes économiques de valorisation des effacements peuvent être associés à la flexibilité, comme c'est envisagé pour le projet présenté dans l'Encadré 11. Validé par la CRE en 2014, « ce dispositif innovant permet aux consommateurs ou à des opérateurs d'effacement de valoriser directement leurs réductions de consommation sur le marché de l'électricité »³⁵. Les mécanismes d'effacements sont contractualisés entre le consommateur et RTE ou un autre opérateur d'effacement, notamment des agrégateurs d'effacement.

Encadré 11 : Acteur flexible vis-à-vis de la consommation : exemple avec le projet de valorisation de chaleur fatale à Grenoble

La thèse de (Hampikian 2017) sur la valorisation de chaleur ne met pas en évidence de flexibilité proposée par les acteurs. Nous présentons un exemple rencontré au cours de nos travaux. Il s'agit du projet de valorisation de chaleur du Laboratoire National de Champs Magnétiques Intenses (LNCMI) situé sur la Presqu'île de Grenoble. Le LNCMI permet à des chercheurs de réaliser des expériences pour de la recherche mobilisant des applications de champs magnétiques intenses. Ces expériences sont fortement consommatrices d'électricité. Le LNCMI dispose de flexibilité, du point de vue de la consommation d'électricité, car le planning d'expériences pourrait être modifié afin d'adapter la production aux besoins du système électrique, tout en prenant en compte les contraintes de travail des chercheurs, les tarifs d'électricité en vigueur, etc. Cette flexibilité pourrait faire l'objet de mécanismes de valorisation des effacements.

Flexibilité de la production

Il existe également une flexibilité possible vis-à-vis de la production. Parmi les énergies renouvelables intermittentes, nous considérons les productions hydraulique et biomasse comme flexibles. En effet, il s'agit d'augmenter ou de réduire le débit ou l'approvisionnement pour bénéficier d'une certaine flexibilité. Les producteurs d'énergie fatale sont majoritairement considérés comme des sources de production peu flexibles. Cependant, nous considérons que ces acteurs peuvent parfois proposer une certaine flexibilité qu'il est alors important de prendre en compte. L'Encadré 12 présente la flexibilité d'un acteur, dont les installations sont fortement consommatrices d'électricité, vis-à-vis de la production de chaleur issue du fonctionnement de ces installations.

³⁵ RTE, page « La fiabilité de notre réseau au service de la performance économique », *RTE France*, 12 septembre 2014, consultée le 11 février 2020, <https://rte-france.com/fr/article/la-fiabilite-de-notre-reseau-au-service-de-la-performance-economique>.

Encadré 12 : Acteurs flexibles vis-à-vis de leur production : exemple avec le projet de valorisation de chaleur fatale à Grenoble

La thèse de (Hampikian 2017) sur la valorisation de chaleur ne met pas non plus en évidence de flexibilité des acteurs vis-à-vis de leur production. Il s'agit même plutôt du contraire dans le cas du projet d'ArcelorMittal : la production de chaleur est basée sur la production industrielle. Ainsi, le directeur du service énergie de la ville de Dunkerque exprime la prévalence de la production industrielle sur la production de chaleur : « *Le point qui est un peu gênant c'est qu'Arcelor, sa vocation ce n'est pas de faire de la chaleur. Donc lui quand il y a un problème technique, quand il y a une baisse d'activité en métallurgie, parce qu'il n'y a pas de commande, eux ils coupent, et quelle que soit la saison. Donc ça peut arriver qu'en hiver, on ferme les robinets* » (Entretien avec le directeur du service énergie de la ville de Dunkerque – 15/04/2015).

Lors de notre travail de recherche, nous avons identifié un acteur dont les installations sont fortement consommatrices d'électricité proposant une certaine flexibilité. Il s'agit du projet de valorisation de chaleur du Laboratoire National de Champs Magnétiques Intenses (LNCMI) situé sur la Presqu'île de Grenoble. Le LNCMI permet à des chercheurs de réaliser des expériences fortement consommatrices d'électricité rejetant ensuite, encore actuellement, la chaleur produite dans la rivière Isère. L'encadré précédent présente cette flexibilité du point de vue de la consommation d'électricité. Un autre projet vise à réinjecter cette chaleur dans le réseau de chaleur urbain de la ville de Grenoble. Le LNCMI dispose également de flexibilité du point de vue de la production pour la même raison. En effet, le planning d'expériences peut être modifié afin d'adapter la production, mais cette fois à la consommation des clients du réseau de chaleur (Pajot 2019).

La flexibilité liée au stockage

Enfin, nous considérons le stockage comme un système permettant de bénéficier de flexibilité. En revanche les coûts, l'impact économique ou encore l'encombrement peuvent être non négligeables (Lund et al. 2016). Le stockage de chaleur est majoritairement réalisé sous forme de chaleur pour des raisons de rendement. Il y a en effet beaucoup de perte lorsque l'on cherche à convertir de la chaleur en électricité. En revanche plusieurs formes de stockage sont envisagées pour l'électricité : stockage en batteries sous forme chimique, stockage thermique, stockage sous forme potentielle. Le stockage sous forme potentielle nous semble peu réalisable dans le cadre de SELBC, car l'échelle du projet est petite et la place limitée. (Lund et al. 2016) met en évidence que le stockage chimique coûte environ 100 fois plus que le stockage thermique. Dans les SELBC, les deux types de stockage sont envisagés. L'Encadré 13 présente un projet photovoltaïque intégrant des ballons d'eau chaude permettant d'augmenter le taux d'autoconsommation du projet.

Encadré 13 : Stockage (chaleur) et flexibilité : exemple avec un projet d'autoconsommation collective

A partir d'un entretien avec un membre d'un projet d'autoconsommation collective, mené dans le cadre du projet de recherche Eco-SESA, nous pouvons mettre en évidence que l'intérêt des acteurs se porte sur des ballons de chaleur programmables permettant d'adapter temporellement la disponibilité de la chaleur produite localement à la consommation. Ces ballons jouent le rôle de stockage. Ainsi un membre du projet explique : « *Voilà, c'est vrai que l'autoconsommation, après l'autoconsommation collective, c'est une particularité au sein de notre groupe, mais l'autoconsommation d'une manière générale, c'est voir comment on peut optimiser l'absorption de l'énergie, de l'électricité qu'on produit en journée. Nous, effectivement, on passe par les chauffe-eaux [...] qui sont programmables et qui permettent de programmer de manière séquentielle tout au long de la journée, pour pas que tous les chauffe-eaux se mettent en marche en même temps pour qu'il y ait le temps de relation avec la production des PV. Donc ça c'est important. Par exemple aussi, j'ai laissé les plages horaires entre 12-14 libres, c'est-à-dire sans chauffe-eau pour que tous ceux qui ont la cuisine, donc il y en a beaucoup, on est 2 à avoir du gaz je crois, 2 sur 11, ça fait 9 autres sur l'électricité. Ça veut dire qu'entre midi et deux, on va essayer d'autoconsommer cette partie-là* » (Entretien avec un membre d'un projet d'autoconsommation collective – 2/06/2018).

I.2.iii.b Sobriété énergétique

La sobriété consiste à modérer la consommation. Dans le cadre d'un SELBC, et plus largement d'un projet énergétique, il s'agit de prendre des dispositions pour restreindre la consommation d'énergie aux besoins essentiels. La démarche négaWatt recommande de « prioriser les besoins énergétiques essentiels dans les usages individuels et collectifs de l'énergie »³⁶. Dans le cadre de certains projets, cet objectif est élargi à d'autres flux : la consommation d'eau, les déchets... Bien qu'il vaille mieux envisager la sobriété dès la phase de conception pour éviter un surdimensionnement des systèmes de production, celle-ci peut être envisagée également une fois le système en fonctionnement. L'Encadré 14 présente un cas d'application de la sobriété dans le cadre d'un projet d'éco-quartier bas-carbone. On peut voir que les questions de sobriété dépassent le système technique.

³⁶ Association négaWatt, page « La démarche négaWatt », *négaWatt*, 2016, consultée en avril 2020, <https://negawatt.org/La-demarche-negaWatt>.

Encadré 14 : La sobriété dans le cadre du projet GreenCity

Le projet GreenCity à Zurich (M. Marquet 2018) développe une vision globale de la sobriété : elle ne se limite pas aux bâtiments mais englobe les usages du quartier dans son ensemble. Pour cela, le projet se base sur le concept de « société 2000 watts ». La société 2000 watts est une approche suisse qui vise à limiter la puissance moyenne de consommation du quartier à 2000 watts par personne (dont l'équivalent en énergie serait une moyenne de 48 kWh par jour et par personne). Les axes de sobriété proposés dans le cadre du projet pour limiter les consommations sont le refroidissement des bâtiments de manière passive en *free cooling*, le développement des transports en commun et l'accessibilité en mobilité douce. Cette approche peut également chercher à prendre en compte l'énergie grise, quantité d'énergie consommée sur l'ensemble du cycle de vie du système (de l'extraction des matières premières à la fin de vie), en plus des consommations énergétiques.

I.2.iv Du système énergétique à l'assemblage socio-énergétique

L'étude des caractéristiques techniques des SELBC, associée des exemples présentés dans les encadrés, nous permet de mettre en évidence l'imbrication entre le système technique et les acteurs du projet. En effet, les exemples susmentionnés montrent que les choix techniques – ou du moins considérés comme tels – ont en fait un impact sur les acteurs du projet et inversement. Par exemple, le choix de mutualiser le système de valorisation de chaleur entre l'industriel et la ville crée une problématique de dépendance entre les acteurs (cf. Encadré 9). Par ailleurs, un choix technologique peut entraîner l'implication de certains acteurs plutôt que d'autres. En effet, le choix d'échanger de l'électricité implique, dans le cadre réglementaire français, de travailler avec le gestionnaire de réseau d'électricité (cf. Encadré 2), ou encore, le choix de ne pas produire de froid à partir du système technique, implique de ne pas connecter certains consommateurs nécessitant du froid (et donc un refus de la part de certains promoteurs de se baser sur la technologie proposée) (cf. Encadré 7).

Ces constats nous amènent à nous interroger sur une conception purement technique des systèmes énergétiques locaux bas-carbone, et plus largement des systèmes énergétiques. De fait, (Latour 1992) a déjà bien identifié qu'« un objet purement technique n'est qu'une utopie ». Étudiant la conception du métro parisien « Aramis », qui ne verra jamais le jour, il écrit : « aux techniciens, j'ai voulu montrer qu'ils ne pouvaient pas concevoir un objet technique sans prendre en compte la foule des humains, leurs passions, leurs politiques, leurs pauvres calculs et qu'en devenant de bons sociologues et de bons humanistes, ils en deviendraient de meilleurs ingénieurs et des décideurs plus avisés. Un objet purement technique n'est qu'une utopie ».

Deux grandes théories s'intéressent au caractère socio-technique (liant acteurs et techniques) des systèmes. La théorie de l'acteur réseau (Akrich, Callon, et Latour 2006; Latour 2007), aussi appelée théorie de la sociologie de la traduction, ou Actor Network Theory (ANT) en anglais, analyse en effet les systèmes comme un réseau d'actants, humains et non-humains (équipements techniques énergétiques et non énergétiques, cadre réglementaire...). Cette théorie propose une analyse « plate » des projets considérant que les actants humains et les actants non humains sont à considérer au même

niveau, car ils peuvent tous les deux influencer dans les prises de décision. La théorie des assemblages (Deleuze et Guattari 1980; Farias et Bender 2010) considère un système comme un agencement d'éléments de nature différente liés entre eux et met l'accent sur les relations entre ces éléments. Bien qu'elles puissent avoir une approche différente et des divergences (Müller 2015; Debizet 2018), c'est la prise en compte du caractère socio-technique des projets énergétiques qui nous intéresse ici (Debizet 2018; Aubert 2020).

(Aubert 2020, 125) met en évidence deux autres points communs qu'il nous paraît intéressant de mentionner : d'un côté, « les éléments [de l'assemblage] ne sont jamais préétablis, il n'y a pas de déterminisme social ou technique » ; et de l'autre, « l'assemblage a un caractère relationnel et processuel : il permet de saisir des processus de mise en lien de différents éléments, les uns par rapport aux autres ».

Ainsi, le système technique (vision généralement proposée par les ingénieurs) serait en fait à considérer comme un assemblage socio-énergétique (vision proposée par l'ANT et la théorie de l'assemblage) associant actants humains et actants non-humains (équipements techniques énergétiques et non énergétiques, cadre réglementaire...), se composant, se décomposant et se recomposant selon les choix envisagés et pris au cours du projet. Cette notion permet d'expliquer qu'une décision prise sur un élément de l'assemblage, puisse avoir un impact – *a priori* inattendu – sur un autre élément de l'assemblage, comme présenté dans les encadrés.

Il nous semble donc important à retenir que bien que nous cherchons à accompagner la conception de systèmes énergétiques locaux bas-carbone, celle-ci ne peut se faire sans une considération de l'assemblage socio-énergétique qui lui est lié.

1.3 Acteurs des SELBC

Comme nous l'avons mis en évidence dans la partie précédente, la prise en compte des acteurs nous semble essentielle dans la conception des SELBC. Ces derniers sont multiples dans les phases de conception et de gestion. On observe une coconception et une cogestion des SELBC. Une multiplicité d'acteurs implique une multiplicité de visions du projet et donc de multiples façons de concevoir le système (Hinker et al. 2017) ; qui peut être source de conflits dans la conception ou la gestion du SELBC. (Terrin 2014, 207) considère ainsi que « la conception d'un ouvrage est généralement fondée sur la confrontation – et implique donc la prise en compte – de plusieurs projets qui correspondent à autant de points de vue ». Pour accompagner la conception des SELBC, il nous semble essentiel de chercher à comprendre qui sont les acteurs, quel est leur rôle et leur diversité de points de vue vis-à-vis du projet afin d'aider à imaginer un projet énergétique commun. Pour cela, une première étape est d'identifier les acteurs ayant une influence sur la conception et/ou la gestion des SELBC, comme nous le faisons dans cette partie.

Pour ce faire, nous avons mobilisé des travaux ayant déjà caractérisé les acteurs de projets proches de notre objet d'étude. Ainsi, nous nous sommes basée sur deux sources : d'une part, un rapport réalisé par l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme Île-de-France (IAU IdF) (1.3.i), et d'autre part, des travaux

réalisés dans le cadre de la recherche Eco quartier Nexus Énergie³⁷ (I.3.ii). Sur cette base, nous avons construit notre propre typologie d’acteurs adaptée aux SELBC (I.3.iii).

I.3.i Typologie d’acteurs proposée par l’Institut d’Aménagement et d’Urbanisme Île-de-France (IAU IdF)

Le rapport de l’Institut d’Aménagement et d’Urbanisme Île-de-France (IAU IdF), intitulé « les facteurs sociologiques de réussite des projets de transition énergétique » (Vaisman et al. 2018) concerne « les projets de transition énergétique ». L’étude est basée plus précisément sur les « projets participatifs multiacteurs de transition énergétique en Île-de-France ». Vingt-neuf entretiens ont été réalisés pour cette étude. Douze types d’acteurs ont été identifiés regroupés en trois grandes catégories : acteurs publics, acteurs privés et société civile (cf. Figure 10). Parmi les acteurs publics, sont considérés les services de collectivités, les élus de collectivités, et les autres institutions. Parmi les acteurs dits « privés », sont considérés les opérateurs d’énergie historiques (producteurs, fournisseurs d’énergies renouvelables et non renouvelables) ou émergents (fournisseurs « d’énergie verte »), les développeurs de projets de transition énergétique, les experts techniques, les entreprises locales, les banques et les plateformes de financement. Parmi les acteurs de la société civile, sont considérés les citoyens, les associations et les mouvements de type « NIMBY », i.e. « Not In My BackYard » traduit en français par « pas dans mon arrière-cour ».

Acteurs publics	Acteurs privés		Société civile
Services de collectivités	Opérateurs	Banques	Citoyens
Elus de collectivités	Développeurs	Plateformes financement	Associations
Institutions autres	Entreprises locales	Experts	Mouvements "NIMBY"

Figure 10 : Catégories d’acteurs impliqués dans les projets de transition énergétique selon l’IAU IdF | Source : (Vaisman et al. 2018, 19)

Cette typologie mobilise de façon non explicite trois registres de classement : la nature juridique de l’acteur (public, privé, associatif), la fonction générale (opérateurs énergies, banques), et le rôle joué dans le projet (experts, développeurs). Ainsi, une entreprise locale pourrait également jouer un rôle d’expertise, de développeur du projet, tout en ayant la fonction d’opérateur énergétique. Or, il nous

³⁷ Page « Le Projet scientifique – nexus », consultée le 13 février 2020, <https://sites.google.com/a/iepg.fr/nexus/projetEQ>.

paraît nécessaire de s'intéresser plus précisément au rôle des acteurs. En effet, le rapport de l'IAU IdF explique que « *les interviewés ne s'accordent pas toujours sur la répartition des tâches et des rôles entre les acteurs. Un même acteur peut être amené à jouer des rôles différents d'un projet à l'autre, ou plusieurs rôles au sein d'un même projet. [...] En outre, certains acteurs peuvent intervenir en « doublon » sur certaines fonctions, d'où certaines tensions et confusions sur les fonctions et responsabilités de chacun* ».

Ainsi, dans cette thèse, nous nous intéressons au rôle des acteurs dans le projet en considérant non seulement la conception du système technique mais aussi les modalités de sa gestion. Nous ne reprenons donc pas la catégorisation englobante liée à la nature juridique des acteurs et nous nous interrogeons sur l'intérêt de définir les acteurs par leur fonction générale. En effet, la fonction générale ne renseigne pas sur l'influence de l'acteur sur le projet, ni sur l'implication effective de l'acteur dans la conception. Cela nous conduit à explorer une typologie plus adaptée centrée sur le rôle des acteurs.

1.3.ii Typologie d'acteurs proposée dans le cadre du projet Nexus

C'est le cas de la recherche Eco quartier-Nexus-Énergie. Cette recherche a été menée pour comprendre les jeux d'acteurs dans des projets novateurs de systèmes énergétiques réalisés dans le cadre d'éco quartiers. Trente-cinq entretiens ont été réalisés dans quatre éco quartiers français mobilisant les principales ressources énergétiques renouvelables *in situ*. Le deuxième rapport intermédiaire de cette recherche (Debizet (dir) 2013), consacré aux enquêtes de terrain ainsi qu'au codage des entretiens, réalisés via un logiciel d'analyse de discours (Nvivo), a permis d'identifier quinze acteurs types. Ces catégories et les codes associés sont identifiés dans la Figure 11.

CODES3_ACTEURS	
<input type="radio"/>	Ac_Amenageur
<input type="radio"/>	Ac_Architecte
<input type="radio"/>	Ac_AssistantMaitreOuvrage
<input type="radio"/>	Ac_BureauEtude
<input type="radio"/>	Ac_CollectivitesTerritoriales-Autre
<input type="radio"/>	Ac_CollectivitesTerritoriales-Elu
<input type="radio"/>	Ac_ExploitantMaintenance
<input type="radio"/>	Ac_Habitant
<input type="radio"/>	Ac_Installateur
<input type="radio"/>	Ac_MaitreOuvrage
<input type="radio"/>	Ac_OperateurEnergie
<input type="radio"/>	Ac_PrescriptionsEcrites
<input type="radio"/>	Ac_ProjetsProgrammesOperacions
<input type="radio"/>	Ac_ServicesAgencesEtat-Autre
<input type="radio"/>	Ac_ServicesAgencesEtat-Elu

Figure 11 : Catégories d'acteurs identifiés dans le cadre du projet Nexus | Source : Auteure - extrait de Nivo, issus des travaux de recherche Eco quartier-Nexus-Énergie

On retrouve les acteurs des services de l'État d'une part, et des collectivités territoriales d'autre part, en distinguant les élus des agents de ces administrations. D'autres types d'acteurs sont également

identifiés : aménageurs, architectes, maîtres d’ouvrage et assistants à maîtrise d’ouvrage, bureaux d’étude, exploitants et chargés de maintenance, installateurs, opérateurs d’énergie et habitants. De plus, le projet Nexus se basant sur la théorie de l’acteur réseau (Akrich, Callon, et Latour 2006) (cf. I.2.iv), des actants non humains sont également pris en compte. Ainsi, les prescriptions écrites et les projets ou programmes d’opération sont également identifiés en tant qu’actants. Les prescriptions écrites s’imposent aux acteurs, comme par exemple des réglementations. Quant aux projets ou programmes d’opération ils se rapportent à des normes relevant de la culture ou de la pratique.

Cette typologie réfère principalement au rôle joué par ces acteurs. Les acteurs de l’énergie sont cependant principalement regroupés dans la catégorie « Opérateur énergie ». **Or comme nous l’avons vu en première partie de ce chapitre (cf. I.1), le rôle des acteurs de l’énergie ayant évolué dans le cadre des SELBC, il nous semble nécessaire d’identifier des catégories plus précises.** Nous proposons donc dans la section suivante une nouvelle typologie inspirée des deux typologies précédentes, mais tenant compte de nos besoins précisés précédemment.

I.3.iii Proposition d’une nouvelle typologie d’acteurs

I.3.iii.a La notion des nœuds socio-énergétiques

Pour tenter d’identifier l’ensemble des rôles assurés par les acteurs opérateurs de l’énergie, nous nous basons sur la notion de Nœud Socio-Énergétique (NSE). Celle-ci se base sur la notion d’assemblage et d’ANT (cf. I.2.iv). Un nœud socio-énergétique est défini par (Debizet 2018) comme « un ensemble d’éléments, qui collecte, convertit et/ou distribue de l’énergie, construit par un acteur décisionnel en interaction avec des actants ». (Debizet 2018) considère alors « que le (les) système(s) énergétique(s) urbain(s) qui assure(nt) l’approvisionnement en énergie des citoyens est (sont) formé(s) par assemblage de nœuds socio-énergétiques ». Dans notre cas l’idée est de proposer un découpage selon les nœuds socio-énergétiques, i.e. selon les domaines de responsabilité des acteurs associés à leur rôle vis-à-vis du système technique. Nos travaux s’intéressent également à la phase de gestion, **nous ajoutons dans la définition du nœud socio-énergétique la phase d’opération donnant alors la définition suivante : « un ensemble d’éléments, qui collecte, convertit et/ou distribue de l’énergie, construit ou opéré par un acteur décisionnel en interaction avec des actants ».**

Pour identifier les nœuds socio-énergétiques (et les acteurs associés) nous sommes partie du consommateur et avons suivi les flux énergétiques (cf. Figure 12). L’objectif de ce travail est de rester assez générique afin de limiter les spécificités liées aux vecteurs énergétiques. Pour simplifier les explications, nous considérons un seul actant par type d’actant, bien qu’en pratique il puisse y en avoir plusieurs du même type au sein d’un même SELBC.

I.3.iii.b Les acteurs des SELBC

L’ensemble des catégories identifiées dans cette section sont synthétisées dans le Tableau 1. Le premier type d’acteur considéré est un « **consommateur** » dont le nœud socio-énergétique est

composé d'une unité de consommation associée au SELBC³⁸. Le flux énergétique consommé peut provenir de trois sources : d'une unité de production locale associée au SELBC via un réseau privé³⁹, d'une unité de stockage via un réseau privé et/ou du réseau principal de distribution (public ou privé), considéré alors comme faisant partie (du moins en partie) du SELBC. Le réseau privé entre l'unité de production locale et/ou l'unité de stockage et l'unité de consommation peut potentiellement faire partie du nœud socio-énergétique de l'acteur consommateur⁴⁰.

L'unité de production locale associée au SELBC fait, quant à elle, partie du nœud socio-énergétique du « **producteur** ». Le flux énergétique produit par cette unité de production peut être directement consommé par le consommateur via un réseau privé, peut être renvoyé sur le réseau principal de distribution ou encore peut-être stocké via un réseau privé. Les réseaux privés peuvent également faire partie, ou non, du nœud socio-énergétique du producteur. Les producteurs peuvent être par exemple des industriels électro-intensifs ou des collectifs d'énergies renouvelables.

L'unité de stockage et les réseaux privés associés peuvent faire partie du nœud socio-énergétique d'un acteur « **stockeur** »⁴¹. Cette énergie stockée peut alors être directement consommée par le consommateur en passant via le réseau privé, ou renvoyée vers le réseau principal de distribution.

Si un acteur possède à la fois une unité de consommation et une unité de production, on parle alors du rôle de « consomm'acteur », appelé en anglais « prosumer » venant de « producer », producteur, et « consumer », consommateur. Ce second terme étant plus fidèle à la définition, nous choisissons dans cette thèse de conserver le terme en anglais. Il nous semble essentiel d'identifier cet acteur en tant que tel, car les logiques d'action de ce type d'acteur ne correspondent pas nécessairement à la

³⁸ La notion de nœud socio-énergétique n'intègre pas l'action de consommer. Le système technique n'a en effet pas pour action de consommer : c'est plus précisément un moyen nécessaire au consommateur pour réaliser une activité. Cependant, pour des raisons de simplification, nous considérerons que la partie du système énergétique, dont le consommateur est responsable, est également un nœud socio-énergétique.

³⁹ Ce réseau peut être un simple câble ou tuyau : nous utilisons le mot « réseau » pour garder une généralité dans les explications.

⁴⁰ La frontière au niveau des connexions entre les différentes unités énergétiques est souvent floue. Nous n'avons pas cherché à identifier un acteur unique responsable de ces zones pour deux raisons. La première est que la responsabilité, si elle n'est pas définie par la loi, varie selon les projets. La seconde est que le fait de conserver des frontières floues est nécessaire à l'innovation, et plus généralement à la coopération (Boutinet 2015).

⁴¹ En pratique nous n'avons pas identifié le rôle de stockeur séparé d'un autre rôle (principalement consommateur, producteur ou gestionnaire réseau). Cependant, le rôle associé n'étant pas toujours le même. De plus, un acteur dédié uniquement à la gestion du stockage a été envisagé dans un projet. C'est pourquoi nous avons choisi de considérer ce rôle à part entière.

somme des logiques d'actions des deux acteurs : consommateur et producteur. Déjà possible dans le cadre de l'autoconsommation individuelle, le rôle de *prosumer* se développe actuellement dans le cadre de l'autoconsommation collective en France (cf. V.2.i.a). Le rôle de *prosumer* continuera probablement de se développer dans le cadre des communautés énergétiques citoyennes et communautés énergétiques renouvelables définies par deux directives européennes : « Énergies renouvelables » « Marché de l'électricité »⁴². On peut envisager que le *prosumer* intègre également une unité de stockage et le réseau privé associé au sein de son nœud socio-énergétique.

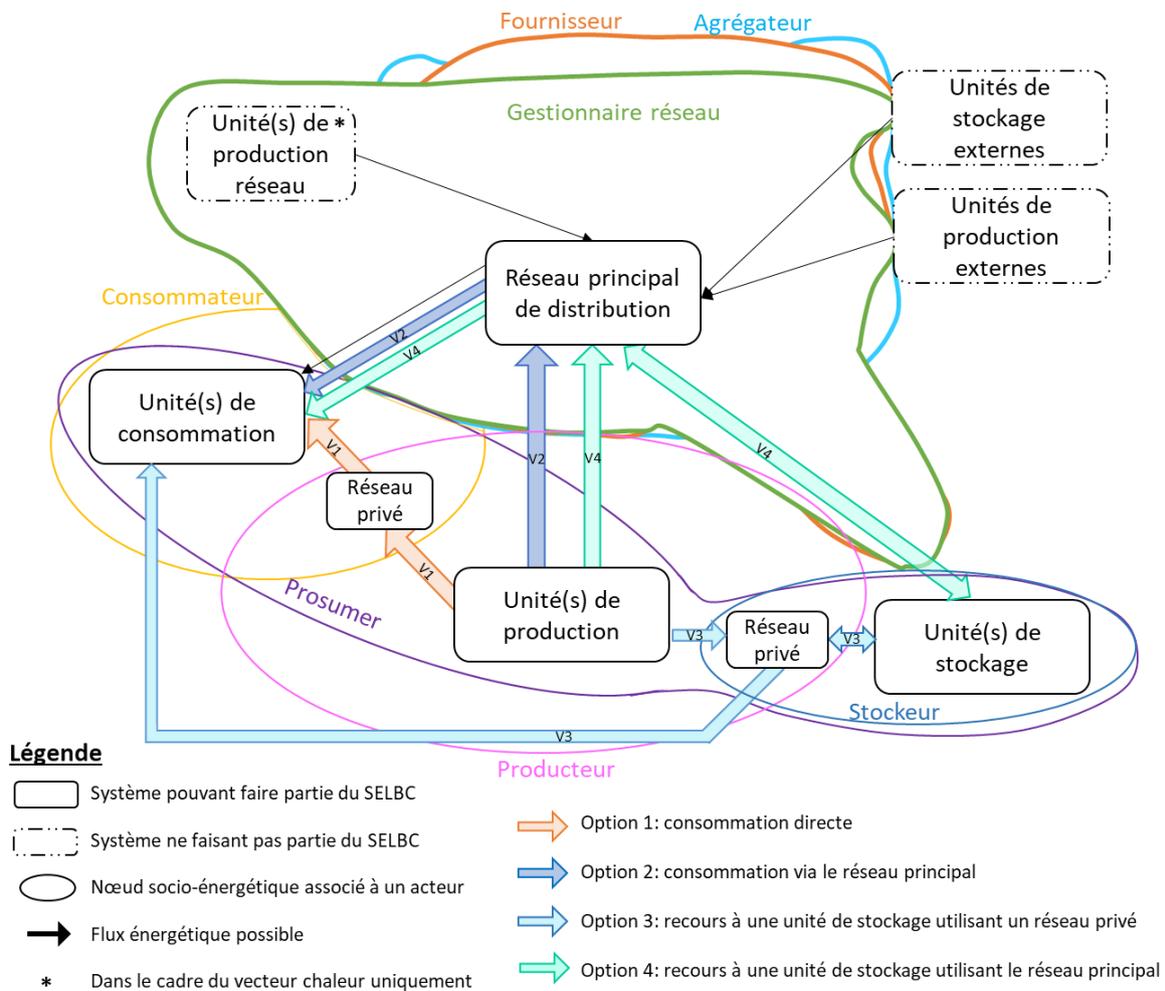


Figure 12 : Représentation graphique des acteurs énergétiques d'un SELBC avec leur nœud socio-énergétique | Source : Auteure

⁴² Enercoop, page « Les communautés énergétiques : définition des futurs moteurs européens de la transition énergétique citoyenne », 6 mai 2020, consultée le 22 juillet 2020, <https://www.enercoop.fr/content/les-communautes-energetiques-definition-des-futurs-moteurs-europeens-de-la-transition>.

À chaque fois, nous avons indiqué que l'énergie pouvait également transiter via le réseau principal de distribution. Ce dernier peut être public ou privé, selon le SELBC envisagé. Plusieurs rôles autour du réseau principal de distribution peuvent être identifiés. Le réseau principal de distribution est tout d'abord géré par le « gestionnaire réseau ». Ce rôle consiste à assurer le fonctionnement et le développement du réseau. Il nous faut, pour une fois, préciser le rôle en fonction du vecteur énergétique. En effet, comme indiqué dans la première partie, en France, les marchés de l'électricité et du gaz ont été libéralisés à l'inverse de la chaleur. Ainsi, les gestionnaires des réseaux d'électricité et de gaz s'assurent que les flux énergétiques puissent transiter par les réseaux, mais ils ne s'occupent pas d'assurer la fourniture d'énergie, à l'inverse des gestionnaires des réseaux de chaleur qui s'en occupent. Il nous semble donc opportun de différencier le « **gestionnaire du réseau chaleur** » et le « **gestionnaire du réseau électricité-gaz** ». Dans le cas de l'électricité et du gaz la fourniture d'énergie est alors assurée par le « **fournisseur** ». Enfin, un nouveau rôle lié au réseau principal de distribution d'électricité est apparu dernièrement. Il s'agit du rôle d'« **agrégateur** », qui consiste à agréger des capacités de production ou d'effacement dans le but de bénéficier, et de faire bénéficier aux clients, de meilleures offres sur le marché⁴³. Ces trois types d'acteurs ont un nœud socio-énergétique semblable : le réseau principal de distribution d'énergie. On peut ajouter à cette couche énergétique, la couche numérique associée (de l'injection dans le réseau à la fourniture aux abonnés du réseau) pour la collecte des données. Ces acteurs dépassent l'échelle locale du projet. Ils font le lien entre le SELBC et le reste du réseau énergétique. D'autres rôles, et acteurs associés, existent vis-à-vis du reste du réseau énergétique, mais nous ne les prenons pas en compte, car nous les considérons comme extérieurs aux SELBC.

Au-delà des acteurs liés directement aux flux énergétiques, d'autres acteurs peuvent être envisagés (cf. Figure 13). En nous basant sur les catégories proposées par le projet Nexus, nous considérons des catégories plutôt associées à l'aménagement : les « **aménageurs** » et les « **architectes** ». Nous intégrons la catégorie bureau d'étude via le rôle de « **concepteur solution** » associé à la conception technique du système. Il nous faut ajouter les rôles d'« **installateur** » et de « **chargé de maintenance** ». Nous intégrons les habitants dans une catégorie plus large et qui nous semble plus adaptée aux SELBC : les « **riverains** » du SELBC. L'étude de l'IAU IdF fait également référence à plusieurs rôles dans le rapport, bien qu'ils ne soient pas présentés sous formes de catégories. Il nous semble pertinent de noter les rôles cités de « **financeur** », de « **propriétaire (de SELBC)** » et de « **développeur** » (ou porteur du projet). Ce dernier est défini dans le rapport de l'IAU comme

⁴³ Mousseau, Fanny, page « Agrégateurs : pierre angulaire de la décentralisation énergétique », *EnergyStream*, 9 janvier 2017, consultée le 23 juillet 2020, <https://www.energystream-wavestone.com/2017/01/agregateurs-pierre-angulaire-de-decentralisation-energetique/>.

Robiolle, Jérémie, page « Les agrégateurs dans l'énergie », 13 juin 2018, consultée le 22 juillet 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=GoFf4M1eMr0>.

Dalkia, page « L'agrégateur : un nouveau métier pour le marché électrique », *Smartgrids-cre*, consultée le 23 juillet 2020, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=integrationnr-nouveau-metier>.

« assur(ant) les relations avec tous les acteurs liés au projet (...) afin de les convaincre de l'intérêt du projet ». La catégorie de développeur est large et peut intégrer les maîtres d'ouvrage et les assistants à maîtrise d'ouvrage cités dans Nexus, ainsi que les rôles d'animateurs, de facilitateurs, ou encore d'incitateurs mentionnés dans le rapport de l'IAU IdF.

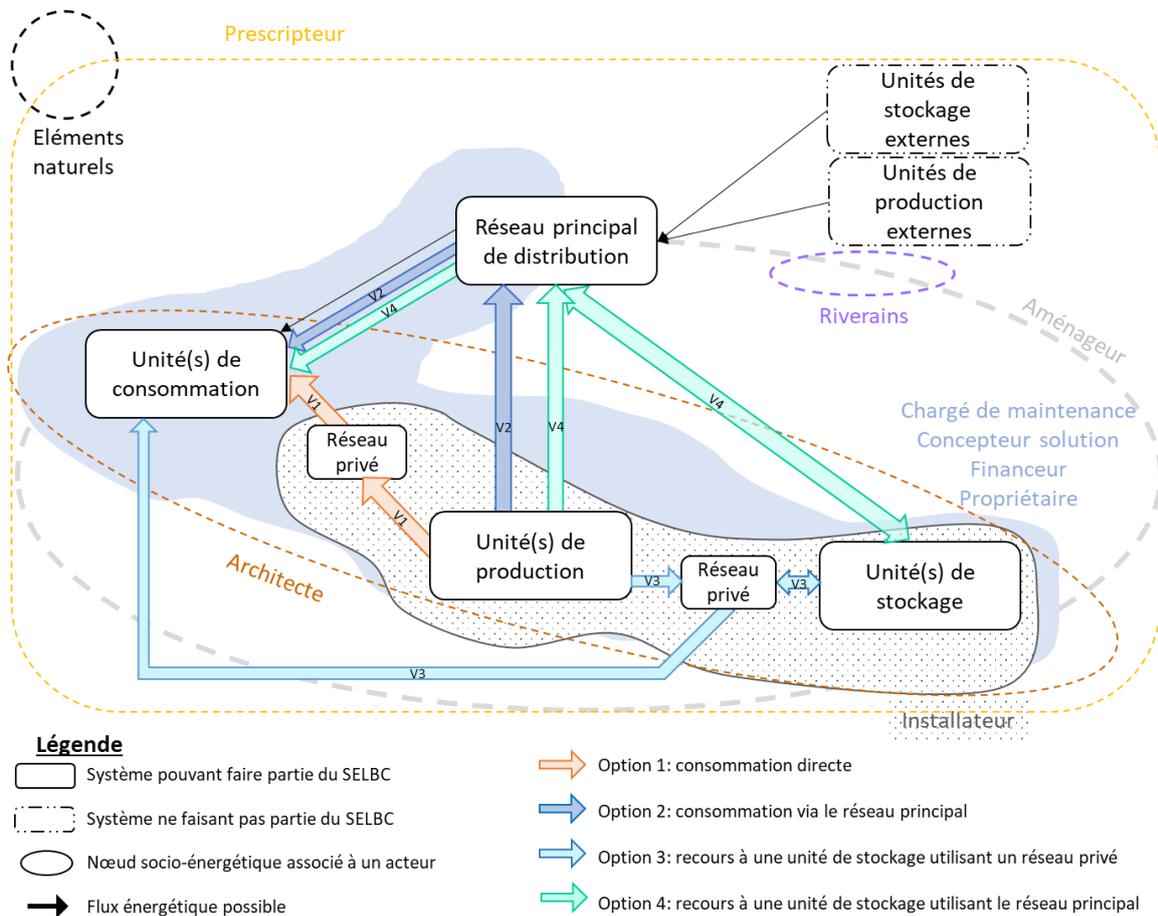


Figure 13 : Représentation graphique des acteurs indirectement engagés dans la conception et dans l'opération d'un SELBC, avec leur domaine de responsabilité potentiel associé, ainsi que des éléments naturels | Source : Auteure

Concernant les acteurs des politiques publiques, le rapport de l'IAU IdF pointe leur diversité. Ainsi les « prérogatives [des collectivités] les amènent à pouvoir endosser la plupart des rôles (propriétaire, animateur, facilitateur, financeur, conseiller, distributeur, producteur, consommateur, incitateur et aménageur...) ». Plusieurs rôles sont déjà cités précédemment, mais il nous semble qu'un rôle important a été omis : celui du régulateur. Ce rôle rejoint la catégorie « prescriptions écrites », identifiée dans le projet Nexus. Dans notre cas nous sommes cependant un peu plus restrictive, car nous ne considérons que les prescriptions en lien avec la régulation. Par ailleurs, il nous semble intéressant de distinguer si la réglementation est associée à un acteur local ou à un acteur extérieur au projet, dans l'idée de mieux cerner dans quel cadre et dans quelles mesures cette réglementation peut être modifiée. Cette distinction sera particulièrement intéressante dans le cadre des réglementations sur les réseaux, car ces derniers sont principalement détenus par les communes. Ainsi, nous distinguons les « **autorités régulatrices locales** » des « **autorités régulatrices extérieures au projet** ».

Un type d'acteur et un type d'actant non humain nous semblent manquer. Concernant l'acteur, il s'agit du rôle de « **prescripteur** », qui consiste à proposer des orientations dans l'idée de résoudre un problème précis. Un prescripteur peut être une association, un consortium, un bureau d'étude, ou encore une agence de l'État... Bien que les prescriptions puissent être transformées en normes par la suite, le prescripteur propose des orientations, sans pour autant les imposer. Concernant l'actant, il s'agit des « **éléments naturels** ». Les éléments naturels interviennent comme ajoutant des limites, voire des contraintes, dans la conception ou dans la phase de fonctionnement du SELBC. En effet, les éléments naturels, tels que nous les entendons, peuvent être compris comme le milieu : la présence d'une rivière peut par exemple empêcher, de prime abord, le déploiement de tuyaux. De même, les éléments naturels peuvent être compris comme les ressources disponibles dans l'environnement du projet comme par exemple la présence de vent ou non qui influera sur le SELBC choisi.

I.3.iii.c Synthèse des acteurs des SELBC et regroupement en trois grandes catégories

Ainsi, nous avons vu que la liste des types d'acteurs pouvait être longue et complexe. Il nous semble à ce moment nécessaire de les regrouper. Nous proposons ainsi de distinguer trois grandes catégories permettant de les regrouper :

- les acteurs que nous considérons comme pouvant avoir une influence substantielle dans la conception ou dans l'opération du SELBC modifiant la forme du SELBC. **Il s'agit pour nous des « parties prenantes » du projet.**
- les acteurs que nous considérons comme non concernés, ou indirectement engagés dans la conception ou dans l'opération des SELBC, car ils suivent ou répondent aux demandes d'autres acteurs (que nous considérons comme directement responsables).
- les éléments naturels, qui sont en fait des actants.

Pour la catégorie des parties prenantes, nous identifions trois sous-catégories :

- **les opérateurs**, qui sont les opérateurs énergétiques du SELBC identifiés à partir des nœuds socio-énergétiques du SELBC et représentés dans la Figure 12,
- **les régulateurs**, qui ont un rôle de régulation qu'il soit local ou global,
- **le développeur**, qui n'appartient à aucune des deux autres catégories, mais qui porte le projet et a donc une influence directe sur sa forme.

Le Tableau 1 résume et décrit les types d'acteurs mis en évidence dans cette section en les regroupant en fonction des grandes catégories identifiées juste au-dessus.

Catégorie	Rôle vis-à-vis de la conception ou de l'opération d'un SELBC ou d'une partie
I - Les acteurs directement responsables dans la conception ou dans le fonctionnement d'un nœud socio-énergétique du SELBC	
A - Les développeurs	
Développeur	Dont le rôle est de porter l'élaboration du SELBC.
B - Les opérateurs	
Agrégateur	Dont le rôle est d'agréger des capacités de production ou d'effacement dans le but de bénéficier, et faire bénéficier à leurs clients, de meilleures offres sur le marché pour de la production ou la consommation associée au SELBC. Ils font le lien entre le SELBC et le reste du réseau énergétique.
Consommateur	Dont le rôle est de consommer de l'énergie pour ses propres usages dans le cadre du SELBC.
Fournisseur	Dont le rôle est de fournir de l'énergie venant de centrales de production aux consommateurs du SELBC, en passant par le réseau de distribution. En dehors de l'échelle locale, ils font le lien entre le SELBC et le reste du réseau énergétique
Gestionnaire réseau chaleur	Dont le rôle est d'assurer le fonctionnement et le développement du réseau de chaleur. Pour cela, il assure la gestion, mais également la production.
Gestionnaire réseau électricité-gaz	Dont le rôle est d'assurer le fonctionnement et le développement du réseau d'électricité ou de gaz. Il assure principalement l'équilibre entre la production et la consommation, en s'appuyant sur les lois pour l'intégration de nouveaux producteurs et consommateurs au sein du réseau.
Producteur	Dont le rôle est de produire de l'énergie dans le but de répondre au moins à une partie des consommations associées au SELBC.
Prosumer	Dont le rôle est de consommer de l'énergie pour ses propres usages, mais également de produire tout ou partie de l'énergie pour ses propres usages ou pour les usages d'autres acteurs du SELBC.
Stockeur	Dont le rôle est de gérer les systèmes de stockage du SELBC.
C - Les régulateurs	
Autorité locale	Dont le rôle est de fixer les règles et les procédures via la réglementation à l'échelle locale. Nous élargissons cette catégorie aux « actants » tels que les PLU et PLUi (Plan Local d'Urbanisme intercommunal), les SCOT (Schéma de Cohérence Territoriale)...
Autorité extérieure au projet	Dont le rôle est de fixer les règles et les procédures via la réglementation à l'échelle nationale, voire internationale. Nous élargissons cette catégorie aux "actants" tels que les lois, les décrets...
II - Les acteurs indirectement engagés dans la conception et dans le fonctionnement du SELBC	
Aménageur	Dont le rôle est de coordonner les interventions nécessaires à l'aménagement du territoire (études d'aménagement, réalisation de plans, réalisation de travaux...)
Architecte	Dont le rôle est de concevoir l'architecture de bâtiments liés au SELBC.
Chargé de maintenance	Dont le rôle est d'assurer la maintenance du SELBC.
Concepteur solutions	Dont le rôle est de concevoir la solution technique liée au SELBC, de l'élément au système. Possiblement des bureaux d'étude, des entreprises de technologies ou encore des maîtres d'œuvre.
Financier	Dont le rôle est de financer tout ou partie du SELBC.
Installateur	Dont le rôle est d'installer les systèmes techniques du SELBC
Prescripteur	Dont le rôle est de proposer des orientations dans l'idée de résoudre un problème précis. Un prescripteur peut-être une association, un consortium, un bureau d'étude ou encore une agence de l'État...
Propriétaire	Intervient comme propriétaire du SELBC ou du moins d'une partie.
Riverain	Intervient comme habitant proche physiquement du SELBC.
III - Les éléments naturels	
Élément naturel	Intervient comme ajoutant des limites, voire des contraintes, dans la conception ou l'opération du SELBC. Peut s'élargir au milieu (exemple : présence de rivières empêchant, de prime abord, le déploiement de tuyaux), ou à l'environnement naturel incluant les ressources (exemple : présence de vent ou non).

Tableau 1 : Catégories des types d'acteurs des SELBC selon leur rôle | Source : Auteure

1.4 Un nouveau paradigme des systèmes énergétiques avec les SELBC

Les parties précédentes nous ont permis de mettre en évidence des évolutions majeures pour les systèmes énergétiques. Au-delà des évolutions déjà identifiées pour les projets basés sur les énergies renouvelables vis-à-vis des grands systèmes énergétiques, de nouvelles évolutions ont pu être mises en évidence, notamment en lien avec le caractère local des SELBC. Ainsi, les SELBC font disparaître la frontière historique entre production et consommation, voire entre fourniture et consommation d'énergie. Des consommateurs « historiques » deviennent producteurs d'énergie (chaleur, électricité, gaz) ou sont amenés à s'interroger sur les échanges d'énergie entre plusieurs consommateurs (électricité). Nous définissons cette absence de frontière nette comme un principe structurant des SELBC. L'altération de la frontière entre la production (et la fourniture) et la consommation autorise à redistribuer les rôles dans la gestion du SELBC, et également dans sa conception. Par ailleurs, nous avons mis en évidence la multiplicité des acteurs. Le caractère multiacteur des SELBC est en fait une propriété intrinsèque des SELBC. Cette multiplicité d'acteurs se traduit par une coconception et une cogestion des SELBC. Ces évolutions, vis-à-vis des grands systèmes énergétiques et des systèmes basés sur les énergies renouvelables plus « classiques », nous invitent à considérer un nouveau paradigme : celui des systèmes énergétiques locaux bas-carbone. Le Tableau 2 ci-dessous résume et compare les caractéristiques de ce paradigme avec les paradigmes « conventionnel » et « nouveau » identifiés par (Bulkeley et Castan Broto, Vanesa 2012).

	Paradigme conventionnel <i>(que nous considérons comme les grands systèmes énergétiques)</i>	Paradigme « Nouveau » <i>(que nous considérons comme les systèmes d'énergies renouvelables « classiques »)</i>	Paradigme « système énergétique local bas-carbone »
Ressource	Stock fini	Flux renouvelable	<i>Flux renouvelable ou de récupération</i>
Type d'énergie	Concentrée	Diffuse	<i>Diffuse</i>
Production	Centralisée	Décentralisée	Centrée sur le local
Technologie	Grande échelle	Petite échelle	<i>Petite échelle</i>
Localisation	<i>En zone peu dense (loin de la consommation)</i>	<i>En zone dense ou peu dense</i>	<i>En zone habitée dense (proche de la consommation)</i>
Marché / Mode de transaction	Monopole	Libéralisé	Contractualisé via des conventions entre acteurs
Conception	<i>Mono-acteur</i>	<i>Mono-acteur</i>	Multiacteur
Impact environnemental	Grand, planétaire	Petit, local	<i>Petit, local</i>

Tableau 2 : Présentation de trois paradigmes : « conventionnel » (grands systèmes énergétiques), « nouveau » (systèmes d'énergies renouvelables « classiques ») et les SELBC (nos ajouts sont en italique) | Source : Auteure (italique) à partir de (Bulkeley et Castan Broto, Vanesa 2012)

1.5 Quelles évolutions des outils d'aide à la conception pour accompagner la conception de systèmes énergétiques locaux bas-carbone?

De nombreux outils d'aide à la conception ont déjà été développés pour accompagner le développement des projets énergétiques : pour les grands systèmes énergétiques dans un premier temps, puis pour les projets d'énergies renouvelables plus « classiques ». Les évolutions mises en évidence précédemment (cf. Tableau 2) nous amènent à nous interroger sur la capacité des outils d'aide à la conception actuels pour accompagner le développement des SELBC. Il nous semble alors essentiel de nous demander : **Quelles évolutions des outils d'aide à la conception sont nécessaires pour accompagner la conception de systèmes énergétiques locaux bas-carbone ?** Nous cherchons dans la suite de cette thèse à proposer des préconisations pour le développement d'outils d'aide à la conception et de modèles dans le cadre de la conception de SELBC.

Les sous-parties suivantes présentent, sous forme de paradoxes, les problématiques auxquelles devraient répondre les outils d'aide à la décision pour accompagner au mieux le développement SELBC.

1.5.i 1^{er} paradoxe : Alors que les informations sur le projet sont incertaines en phase de pré-étude (situation exacerbée dans le cas de projets émergents), les décisions prises par les parties prenantes ont le plus d'impact

Le premier paradoxe concerne la conception de projet de manière large. Il est dû au fait que les décisions ayant le plus d'impact pour le projet sont prises en phase d'étude préliminaire, dite de pré-étude, au moment où il y a le moins d'informations précises sur le projet. De plus, au fur et à mesure que le processus de conception avance, il est de plus en plus coûteux de revenir sur les décisions. Ce paradoxe est également appelé le paradoxe de l'« information – décision ». Ce paradoxe, illustré par la figure ci-dessous, est mis en évidence dans plusieurs disciplines dont les sciences de l'ingénieur (Delhommays 2019; Frédéric Wurtz 2019) et la conception architecturale et urbaine (Terrin 2014, 209; Hollberg et al. 2019; Marie 2019). Ce paradoxe s'applique également à la conception des SELBC. Ce paradoxe est exacerbé dans le cas de projets émergents, tels que les SELBC, principalement du fait de l'incertitude des informations, car le manque d'expérience sur ces projets ne permet pas de connaître l'impact de certaines décisions. **Les outils d'aide à la conception des SELBC devraient donc jouer un rôle d'accompagnement d'aide à la décision dans les phases de pré-études, permettant ainsi de tester et d'envisager plusieurs assemblages pour un même projet de SELBC. L'outil viserait alors à accompagner les acteurs à formuler leur problème.**

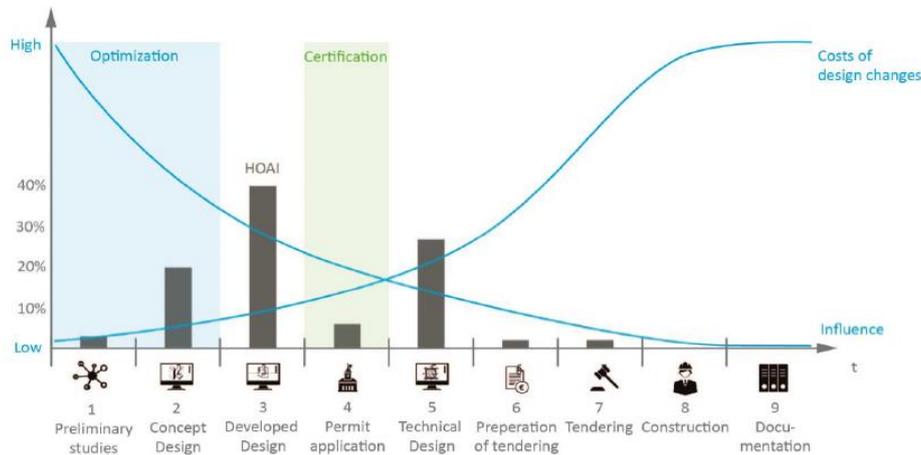


Figure 14 : Représentation du paradoxe d'information-décision et l'importance des phases de d'études préliminaires /
Source : (HOAI 2013) in (Hollberg et al. 2019)

Par ailleurs, nous avons mis en évidence que la phase de gestion devait être considérée dès la phase de conception. C'est pourquoi **les outils d'aide à la conception des SELBC en phase de pré-étude devraient prendre en compte la phase de gestion, i.e. de fonctionnement du système.**

Le Chapitre II, partie II.1, recense les outils les plus adaptés à ces deux besoins.

1.5.ii 2^{ème} paradoxe : Alors que les SELBC impliquent une multitude d'acteurs dans la conception, les outils d'aide à la conception ont été développés pour un acteur unique

Le deuxième paradoxe est lié au fait que les outils d'aide à la décision ont jusqu'à présent été développés pour être utilisés par un acteur unique (« le décideur », généralement celui qui investit dans l'équipement). Or, comme nous l'avons mis en évidence dans ce chapitre, les SELBC mobilisent une multitude d'acteurs, impliquant une coconception des SELBC. Selon nous, ceci impliquerait deux évolutions principales pour les outils. Il faudrait que les outils d'aide à la conception :

- permettent aux parties prenantes de se comprendre, en devenant support de « synchronisation cognitive », selon le concept développé par (Darses 2009) et présenté ci-après,
- permettent aux parties prenantes de négocier les décisions prises par chacun vis-à-vis du SELBC. Dans ce sens, les outils d'aide à la décision pourraient devenir des outils supports de négociation. L'outil serait alors utilisé pour assurer aux acteurs du projet qu'il existe au moins une solution (pour le modèle proposé), plutôt que pour calculer « la » solution du problème.

Le besoin de synchronisation cognitive dans une conception multipartie prenantes

Les parties prenantes étant issues de cultures différentes ou jouant un rôle différent vis-à-vis du projet, elles sont amenées à utiliser un langage différent, limitant l'intercompréhension entre les acteurs. Selon (Darses 2009, 47) « assister la coconception nécessite de faire face à des problèmes d'ajustement cognitif entre concepteurs, rendus plus complexes du fait de l'hétérogénéité des objectifs et des compétences ». (Darses 2009) met ainsi en évidence un **besoin de synchronisation**

cognitive entre les parties prenantes qui a pour but de permettre aux différentes parties prenantes de s'accorder sur une solution satisfaisante. La synchronisation cognitive fait alors référence à « l'ensemble des processus cognitifs qui concourent à faire converger les concepteurs vers une solution acceptée par tous, à partir de connaissances du domaine (comme les contraintes, critères, solutions connues, procédures, etc.) et de connaissances sur la résolution du problème (buts, stratégies, heuristiques, etc.) » (Darses 2009, 49).

La synchronisation cognitive pourrait se concrétiser à partir de **la mise en place d'un « référentiel commun »** et d'une **capacité d'intégration des points de vue des différentes parties prenantes**. Le référentiel commun peut alors s'établir à partir d'objets, de représentations partagées entre toutes ou certaines parties prenantes. (Star 2010, 19) parle d'« objets-frontière », les décrivant comme « un arrangement qui permet à différents groupes de travailler ensemble sans consensus préalable ».

En suivant les préconisations de Darses, les outils d'aide à la conception devraient donc accompagner la synchronisation cognitive. (Darses 2009, 47) note qu'actuellement, « il existe peu d'outils qui assistent les concepteurs dans ce travail de convergence ».

Le besoin de négociation dans une conception multiacteur

Les parties prenantes portent généralement des intérêts différents vis-à-vis du projet. Ces différences peuvent être sources de conflits dans la définition du projet. Il nous semble donc essentiel de chercher à comprendre cette diversité de points de vue, ainsi que de chercher à satisfaire l'ensemble des parties prenantes, et non celles ayant le plus grand pouvoir de décision. Ne pas prendre en compte les demandes d'une des parties prenantes peut mener à l'abandon du projet, comme le montre des exemples suite au mouvement NIMBY (Vaisman et al. 2018). Cependant, l'accumulation des points de vue n'est pas toujours possible. Les parties prenantes devraient donc être amenées à négocier des points bloquants. Il s'agirait alors de trouver une formulation du problème qui permette d'assurer aux acteurs du projet qu'il existe au moins une solution (pour le modèle proposé) plutôt que de rechercher « la » solution du problème. **Les outils d'aide à la décision deviendraient supports de négociation.**

Le Chapitre II identifie des pistes de développement des outils d'aide à la conception pour permettre une synchronisation cognitive et des scènes de négociations entre les parties prenantes via les outils d'aide à la conception.

- I.5.iii 3^{ème} paradoxe : Alors que les différents points de vue des parties formatent le SELBC conçu, ils ne sont pas pris en compte de manière explicite dans les modèles

Comme indiqué précédemment, la conception multipartie prenante implique des points de vue différents, voire divergents, sur le SELBC. Il nous semble nécessaire de prendre en compte ces divergences pour accompagner au mieux la conception. La majorité des outils d'aide à la conception de systèmes énergétiques se limite à une analyse technico-économique et ne prend pas en compte de manière explicite les différents points de vue portés par les acteurs dans les modèles. Or, c'est souvent la solution qui satisfait le moins mal les parties prenantes les plus décisives du projet qui est retenue, et non l'optimum technico-économique identifié par l'outil. (Hinker et al. 2017) parle alors d'un écart entre l'optimum technique et l'optimum socio-technique, qu'il nomme en anglais « socio-technical optimality gap ». **Ainsi, à l'instar d'autres chercheurs** (F. G. N. Li, Trutnevte, et Strachan 2015; Hinker

et al. 2017), nous faisons l'hypothèse qu'il est nécessaire que les outils d'aide à la conception modélisent de manière explicite les points de vue des acteurs sur le projet, en plus des enjeux techniques.

Les Chapitre IV et Chapitre V proposent un modèle adapté à la modélisation des points de vue des parties prenantes des SELBC. Ce modèle est accompagné d'une méthodologie pour proposer une modélisation pertinente.

Conclusion du chapitre I

Ce premier chapitre nous a permis de mettre en évidence des évolutions majeures pour les systèmes énergétiques. Au-delà des évolutions déjà identifiées pour les projets basés sur les énergies renouvelables vis-à-vis des grands systèmes énergétiques, nous avons mis en évidence de nouvelles évolutions. Les systèmes énergétiques de capture et d'échanges *in situ* d'énergie renouvelable intermittente ou de récupération, que nous appelons systèmes énergétiques locaux bas-carbone ou SELBC, redéfinissent la frontière historique entre la production (et la fourniture) et la consommation d'énergie. Ainsi, des consommateurs « historiques » deviennent producteurs d'énergie (chaleur, électricité, gaz) ou sont amenés à s'interroger sur les échanges d'énergie entre plusieurs consommateurs (électricité).

Nous avons également mis en évidence certaines caractéristiques communes aux SELBC liées à la capture (ressource locale, intermittence) ou aux échanges d'énergies (multiacteurs, connexion au réseau, interdépendance des acteurs, foisonnement). Des caractéristiques spécifiques à certains types de SELBC ont également été mises en évidence. L'étude des caractéristiques techniques des SELBC a mis en évidence l'imbrication entre le système technique et les acteurs du projet. C'est pourquoi nous proposons de dépasser la vision purement technique des SELBC et de les considérer comme des assemblages socio-énergétiques (vision proposée par la théorie de l'acteur réseau et la théorie de l'assemblage) associant actants humains et actants non-humains (équipements techniques énergétiques et non énergétiques, cadre règlementaire...). La propriété multiacteur des SELBC a également été mise en évidence, impliquant une coconception et une cogestion des SELBC.

Nous nous sommes alors intéressée aux acteurs des SELBC. L'évolution de la relation entre production et consommation nous a invité à proposer une nouvelle typologie d'acteurs en fonction de leur rôle dans la conception et le fonctionnement des SELBC. Nous nous sommes basée sur des typologies d'acteurs identifiées dans la littérature et sur la théorie des nœuds socio-énergétiques afin de définir notre typologie d'acteurs. Enfin, ces évolutions nous ont amenée à proposer un nouveau paradigme, celui des systèmes énergétiques locaux bas-carbone (cf. Tableau 2).

La conception des systèmes énergétiques est accompagnée par des outils d'aide à la conception. Ces évolutions nous amènent à envisager des évolutions pour les outils d'accompagnement. Prenant en compte le caractère multiacteur des SELBC, cette thèse propose de repenser les outils d'aide à la conception comme outils supports de synchronisation cognitive et de négociation (cf. Chapitre II et Chapitre III). De plus, il nous semble nécessaire que les outils modélisent de manière explicite les visions des acteurs sur le projet (Chapitre IV et Chapitre V).

CHAPITRE II

Outils d'aide à la conception comme support
de synchronisation cognitive et de
négociation entre les parties prenantes d'un
SELBC

II.1	OUTILS D'AIDE A LA CONCEPTION POUR QUE LE MODELE PUISSE ETRE SUPPORT DE NEGOCIATION.....	62
II.1.i	<i>Travailler à partir de modèles compréhensibles : modélisation sous forme de concepts, modeleurs, métamodeleurs, interfaces et notebooks.....</i>	62
II.1.ii	<i>Travailler à partir de modèles accessibles : l'open source.....</i>	65
II.1.iii	<i>Travailler à partir de modèles adaptables : open source et programmation orientée objet (POO).....</i>	65
II.1.iv	<i>Modifier et tester le modèle à de nombreuses reprises : outil d'optimisation MILP.....</i>	66
II.1.v	<i>Synthèse des choix pour un outil d'aide à la conception adapté à la négociation et identification de plusieurs outils.....</i>	68
II.2	LES ENTREES DU MODELE D'OPTIMISATION MILP COMME OBJETS DE DISCUSSION OU DE NEGOCIATION.....	73
II.2.i	<i>Les variables et l'espace de recherche, points clefs de l'optimisation.....</i>	74
II.2.ii	<i>Les données du modèle comme objet de discussion.....</i>	76
II.2.iii	<i>Les contraintes du modèle comme objet de négociation.....</i>	77
II.2.iv	<i>Les objectifs du modèle comme objet de discussion.....</i>	79
II.3	LES SOLUTIONS DU MODELE COMME OBJET DE NEGOCIATION.....	80
II.3.i	<i>Discuter des solutions « optimales » sur un même modèle : identification du front de Pareto.....</i>	81
II.3.ii	<i>Discuter des solutions optimales sur plusieurs modèles : comparer des fronts de Pareto.....</i>	81
II.4	LES REPRESENTATIONS COMME SUPPORT DE SYNCHRONISATION COGNITIVE.....	82
II.4.i	<i>Représentation du modèle.....</i>	82
II.4.ii	<i>Représentation des solutions : le front de Pareto.....</i>	86
II.5	REFLEXIONS SUR LES CONDITIONS D'UTILISATION DES METAMODELEURS D'OPTIMISATION POUR LA NEGOCIATION.....	88
II.5.i	<i>Nécessité d'une négociation voulue par les acteurs.....</i>	88
II.5.ii	<i>Un modèle commun.....</i>	89
II.5.iii	<i>Une formulation commune.....</i>	89
II.5.iv	<i>Une asymétrie de savoir et de savoir-faire entre les parties prenantes.....</i>	89
II.5.v	<i>Un modèle partiel.....</i>	90
II.5.vi	<i>Modélisation subjective : une interprétation portée par les acteurs et non les outils.....</i>	91
II.5.vii	<i>Discuter de solutions non « optimales » : le front de Pareto comme référence.....</i>	91
CONCLUSION DU CHAPITRE II.....		92

Chapitre II. Outils d'aide à la conception comme support de synchronisation cognitive et de négociation entre les parties prenantes d'un SELBC

Cette thèse vise à accompagner la conception des systèmes énergétiques locaux bas-carbone via des outils d'aide à la conception adaptés. La variabilité et la complexité des systèmes énergétiques ont amené les acteurs à se baser sur des outils d'aide à la conception pour accompagner la prise de décision. De nombreux outils de simulation ou d'optimisation ont été développés pour aider les décideurs dans les phases de modélisation et de choix (Connolly et al. 2010; Ringkjøb, Haugan, et Solbrekke 2018; Lopion et al. 2018). Cependant, ces outils ne répondent pas forcément aux besoins que nous avons mis en évidence dans les paradoxes 1 et 2 : **être support de synchronisation cognitive et de négociation pour les phases de pré-étude.**

Quatre phases peuvent être associées à la conception : l'analyse du cahier des charges, le processus de modélisation (ou formulation) du problème, la résolution du problème et l'analyse des résultats (Stéphane Brisset 2007). Les outils d'aide à la conception, tels que nous les entendons, accompagnent la conception sur les trois dernières phases (cf. Figure 15).

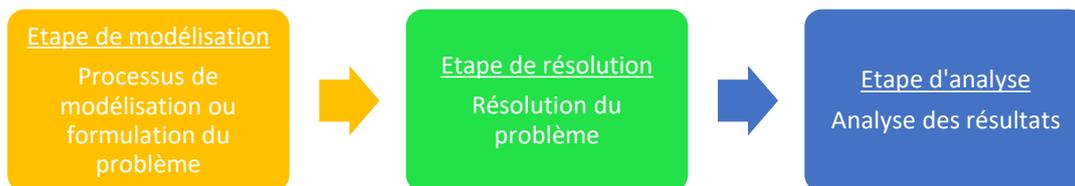
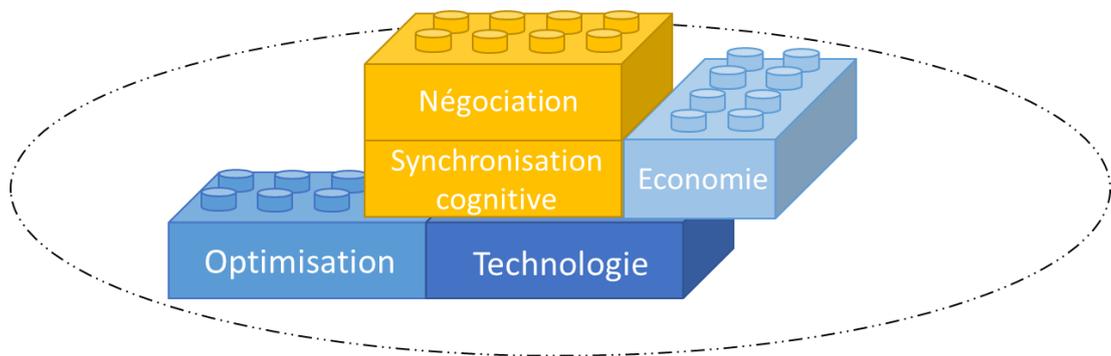


Figure 15 : Les trois phases d'un outil d'aide à la conception | Source : Auteure

Le processus de modélisation ou de formulation du problème sous la forme d'un modèle nous paraît une étape essentielle de la conception multipartie prenante. Nous parlons d'étape de modélisation. Crozier explique que « la solution d'un problème dépend de la manière dont il aura été défini. (...) La lutte, la plupart du temps, ne consiste pas dans une discussion ouverte des coûts et avantages, c'est une lutte sur la définition du problème (...). Car les partenaires savent trop bien qu'une fois cette définition imposée, l'orientation de la décision aura déjà été très fortement structurée » (Crozier et Friedberg 1981, 364). Pour reformuler, si des critères ne sont pas modélisés, ils ne peuvent pas influencer la décision, et à l'inverse, si des critères sont modélisés, ils influencent la décision.

L'étape de modélisation oriente donc l'identification de solutions, et c'est principalement pour cette raison que nous considérons que le modèle, qui décrit ou représente le SELBC envisagé ou du moins une version, devrait être destiné à être négocié. Les deux premières parties de ce chapitre présentent donc comment le modèle peut être support de négociation. La première introduit les besoins pour une négociation multipartie prenante et présente quel type d'outils permet, selon nous, de rendre les modèles support de négociation (II.1). Il s'agit notamment de métamodeleurs d'optimisation MILP. La seconde partie présente donc les entrées d'un problème d'optimisation MILP et propose que celles-ci soient objets de discussion et de négociation (II.2). La résolution du problème étant gérée au sein des outils, nous ne détaillons pas cette étape dans cette thèse. La troisième partie présente comment l'analyse des résultats peut également être support de négociation (II.3). Par ailleurs, une quatrième partie présente comment la représentation graphique peut être support de synchronisation cognitive

pour la conception (II.4). Enfin, dans une dernière partie, nous abordons les limites identifiées pour les outils dans le cadre d'une négociation (II.5). La Figure 16 présente graphiquement les propositions de ce chapitre pour les métamodeleurs.



Légende



Briques de base d'un métamodeleur



Nouvelles briques pour les métamodeleurs

Figure 16 : Penser les métamodeleurs comme supports de synchronisation cognitive et de négociation | Source : Auteure

II.1 Outils d'aide à la conception pour que le modèle puisse être support de négociation

Pour que le modèle puisse devenir objet de négociation, il nous semble nécessaire, *a minima*, que :

- le modèle soit compréhensible par les parties prenantes (II.1.i),
- le modèle soit accessible à ces dernières (II.1.ii),
- le modèle soit adaptable à leurs besoins (II.1.iii),
- le modèle soit modifiable à de nombreuses reprises et solvable rapidement pour comprendre les modifications appliquées (II.1.iv).

Nous cherchons dans cette partie à identifier les outils répondant à ces besoins. Pour conclure, une cartographie d'outils répondant à ces critères dans l'objectif d'accompagner la conception des SELBC est présentée (II.1.v).

- II.1.i Travailler à partir de modèles compréhensibles : modélisation sous forme de concepts, modeleurs, métamodeleurs, interfaces et notebooks

L'utilisation d'un modèle « compréhensible » est une première étape vers la synchronisation cognitive préconisée par (Darses 2009) (cf. I.5.ii). Plusieurs actions permettent de rendre un modèle plus compréhensible : modéliser à partir de concepts proches de ce qui est observable (II.1.i.a), avoir recours à des modeleurs (II.1.i.b), ou encore mieux des métamodeleurs (II.1.i.c), ainsi que des interfaces et des notebooks (II.1.i.d).

- II.1.i.a La notion de concept dans les modèles

Pour qu'un modèle soit compréhensible, il nous semble nécessaire qu'il se base sur des concepts proches de ce qui est observable. On parle alors de langage de « haut niveau ». Le langage orienté objet est une solution technique permettant une modélisation sous forme de concepts. Il consiste à

rassembler au sein d'une « classe » des parties de code associées à un même concept. Cette classe porte alors, de préférence, le nom du concept. **La modélisation orientée objet permet ainsi d'utiliser une sémantique proche de celle utilisée par les parties prenantes** pour décrire la réalité technique (quel sous-système ?) et sociale (qui est responsable ?). Python, Julia, Java, C++ ou encore Ruby sont des langages orientés objets. Cependant, la résolution d'un modèle décrit sous forme de concept n'est pas simple.

II.1.i.b Du modelleur...

Les théories de l'architecture dirigée par les modèles, ou Model Driven Architecture (MDA) (Kleppe, Warmer, et Bast 2003), consistent à différencier le « modèle », construit par le modélisateur (dans notre cas par les parties prenantes), du « modèle » à destination du logiciel informatique pour sa résolution. Le modèle construit par le modélisateur peut alors se baser sur un langage de haut niveau, qui peut s'approcher de la sémantique utilisée par les parties prenantes. Le modèle produit est ensuite projeté, i.e. traduit, dans un langage de bas niveau, compréhensible par l'outil de résolution du problème. Cela permet d'éviter de décrire le système énergétique de manière matricielle ou via un langage algébrique de modélisation (AML), tels que AIMMS, AMPL, GAMS ou MPL, très éloigné du langage commun. **D'un point de vue outil, cette modélisation de haut niveau, puis la traduction en langage de bas niveau, peuvent être réalisées à l'aide d'un modelleur.** En 2018, (Ringkjøb, Haugan, et Solbrekke 2018) identifient 75 modelleurs dans le domaine de l'énergie.

II.1.i.c ... au métamodelleur avec bibliothèque de modèles

Les langages de haut niveau et les modelleurs facilitent la compréhension des modèles et le processus de modélisation. Cependant, notre expérience nous amène à considérer ces évolutions comme insuffisantes, notamment pour des acteurs non experts de l'énergie. **Des bibliothèques de modèles constituées de briques de modèles préconstruites basées sur un langage de haut niveau** commencent à être développées. La construction du modèle est alors simplifiée, car le modélisateur peut utiliser les briques de modèles préconstruites (que l'on pourrait associer à des briques de LEGO comme représenté dans la Figure 17), au lieu de coder l'ensemble du système ligne par ligne. **Nous associons à cette capacité la notion de « métamodelleur », qui est parfois mentionné sous le nom d'outil de « génération de modèles ».**

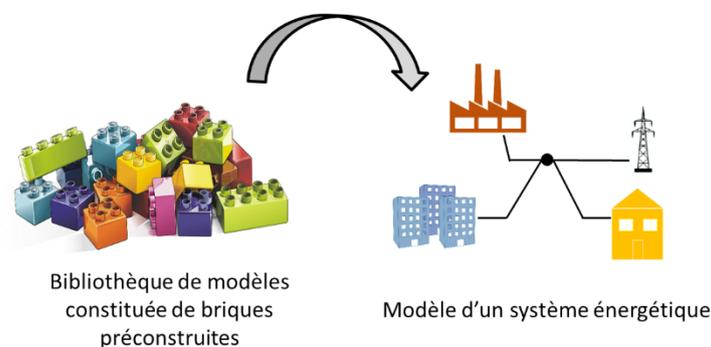


Figure 17 : De la bibliothèque de modèles au modèle | Source : Auteure

Nous avons identifié plusieurs outils qui permettent de répondre à cette capacité de métamodeleur dans le cadre des SELBC. Certains sont déjà largement utilisés, notamment les outils de simulation dynamique tels que Dimosim (Perez et al. 2016), les bibliothèques Modelica (Schweiger et al. 2017), TEASER (Remmen et al. 2018) ou encore TRNSYS⁴⁴. Il en existe également quelques-uns pour l'optimisation, qui sont cependant assez récents et peu répandus dans les communautés. Nous avons identifié : Calliope (Pfenninger et al. 2013), Ehub Modeling tool (Bollinger et Dorer 2017), Ficus (Atabay 2017), REopt (Cutler et al. 2017), oemof (S. Hilpert et al. 2018), OMEGAlpes (Pajot 2019), Artelys Crystal Energy Planner⁴⁵, DER-CAM⁴⁶, ou encore HOMER⁴⁷.

II.1.i.d Jupyter Notebooks et interfaces graphiques

Cependant, malgré le recours à un langage de haut niveau orienté objet et à des briques de modèles préconstruites, la compréhension du modèle n'est pas toujours simple pour des acteurs non experts. **Deux possibilités largement utilisées sont envisageables : les interfaces graphiques ou les notebooks Jupyter.**

L'interface graphique permet aux parties prenantes de décrire graphiquement le modèle générant ensuite automatiquement la description du modèle. Les notebooks Jupyter permettent d'ajouter des images et des explications, en plus du code, pour aider à mieux comprendre le code et les démarches à suivre⁴⁸. Le code peut également être lancé bloc par bloc, permettant de mieux comprendre l'action associée à chaque bloc de code. Le recours à des notebooks Jupyter peut par exemple permettre de modifier un modèle proposé. Étant alors en capacité de comprendre ce qui est modélisé et de le modifier, les acteurs sont plus aptes à négocier le modèle.

⁴⁴ TRNSYS, page « TRNSYS, logiciel de simulation thermique des bâtiments et des systèmes », *Actu-Environnement*, consultée le 6 avril 2018, <https://www.actu-environnement.com/materiels-services/produit/logiciel-trnsys-cstb-simulation-thermique-batiments-et-systemes-2473.php>.

⁴⁵ Artelys, page « Artelys Crystal Energy Planner », *Artelys*, consultée en mai 2016, <https://www.artelys.com/fr/applications/artelys-energy-planner>.

⁴⁶ Berkeley Lab, « Distributed Energy Resources - Customer Adoption Model (DER-CAM) | Building Microgrid », 2018, *Grid Integration Group - Energy Technologies Area*, consultée en mai 2016, <https://building-microgrid.lbl.gov/projects/der-cam>.

⁴⁷ Page « HOMER - Hybrid Renewable and Distributed Generation System Design Software », 2018c consultée le 14 décembre 2018, <https://www.homerenergy.com/>.

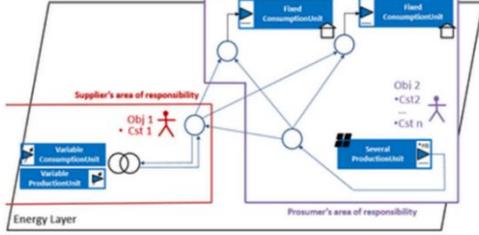
⁴⁸ Project Jupyter, 2020, Jupyter Notebook, Logiciel, consulté le 14 août 2020, <https://www.jupyter.org>.

Study case for the 2019 Building System conference
Article "Multi-actor modelling for MILP energy system optimisation: application to collective self consumption"

This module presents a multi-actor modelling study case for a simple collective self consumption project

The aim of this study case is to decide the number of PV panels which should be installed considering the dwelling loads and the stakeholders objectives and constraints. The module includes :

- Two dwelling loads with a fixed consumption profile
- One PV production unit which can be multiplied
- the network which can produce or consume the energy once required (modelled as a supplier production and consumption units)



```

In[132]: from pulp import *
from omgpcas.actor.operator_actors.consumer_producer_actors import \
    Prosumer, Supplier
from omgpcas.energy.energy_node import EnergyNode
from omgpcas.energy.units.consumption_units import FixedConsumptionUnit, \
    VariableConsumptionUnit
from omgpcas.energy.units.production_units import VariableProductionUnit, \
    FixedProductionUnit, SeveralProductionUnit
from omgpcas.general.optimization_model import OptimizationModel
from omgpcas.general.utils.plots import plot_quantity, plot, \
    plot_time_energy_time
from omgpcas.general.time import TimeUnit
from pyqtgraph import *
from omgpcas.general.widgets import \
    QWidget, Label, UnitLabel, FunctionSlider, RoundFunctionText, ToggleButton, \

```

Texte
Image
Code

Figure 18 : Extrait d'un notebook Jupyter⁴⁹ intégrant texte, image et code | Source : Auteure

II.1.ii Travailler à partir de modèles accessibles : l'open source

Il nous semble également essentiel que l'ensemble des parties prenantes puisse accéder au code. Le terme de « code » peut faire référence au code de l'assemblage socio-énergétique et au code de la bibliothèque de modèles. Nous conseillons que les deux types de code soient accessibles à l'ensemble des parties prenantes. Concernant les outils, le terme de code fait référence, dans cette section, à la bibliothèque de modèles. L'accès au code de la bibliothèque de modèles nous semble essentiel, car cela permet une validation du code par les pairs : on parle de « peer-reviews ». Cette possible validation peut permettre de limiter, ou du moins d'identifier, des erreurs ou des biais dans les modèles codés.

L'open source est un moyen d'assurer l'accessibilité du code, que ce soit sur le court terme ou sur le long terme. Ainsi, la bibliothèque de modèles peut être accessible à qui le souhaite. L'open source permet donc d'apporter de la transparence pour les modèles, et possiblement une plus grande confiance des parties prenantes envers le modèle (S. Hilpert et al. 2018). **C'est pourquoi les métamodeleurs open source nous semblent les plus appropriés.**

II.1.iii Travailler à partir de modèles adaptables : open source et programmation orientée objet (POO)

Au-delà de la capacité des acteurs d'avoir accès au code, l'open source laisse la possibilité de modifier et/ou de compléter la bibliothèque de modèles (Lopion et al. 2018). Dans le cadre de systèmes

⁴⁹ Le notebook présenté sur la Figure 18 est disponible ici : https://mybinder.org/v2/git/https%3A%2F%2Fgricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr%2Fomegalpes%2Fomegalpes_examples/master.

énergétiques émergents et complexes, tels que les SELBC, les besoins pour le modèle ne peuvent pas être totalement prévus dans une bibliothèque de modèles. Les briques de modèles seront donc nécessairement amenées à être modifiées. L'open source permet cette flexibilité, car les parties prenantes ont à disposition les briques de modèles existantes, qu'ils peuvent alors modifier. Ils peuvent également ajouter, si besoin, de nouvelles briques de modèles à la bibliothèque. Ainsi, l'accès au code de la bibliothèque de modèles permet de répondre à la recommandation de (Banos 2016) nous indiquant que « le modélisateur n'est pas le « gardien de la vérité prouvée » » et que « ses modèles doivent être accessibles dans leur intégralité afin d'être reproduits », car la « production de connaissances », menant dans notre cas à un modèle plus adapté, est « itératif et interactif ».

Comme nous venons de le mentionner, en plus d'être adaptable, la bibliothèque de modèles peut être complétée par des modèles développés, en interne ou en externe, pour répondre à de nouveaux besoins exprimés par les acteurs. On parle de capitalisation de modèles. Cette capitalisation de modèle peut être simplifiée grâce à la technique d'héritage proposée par la programmation orientée objet (POO). L'héritage permet de construire de nouvelles briques en s'appuyant directement sur les briques existantes, comme le montre la Figure 19. Le code du nouvel objet se restreint alors uniquement aux nouvelles fonctionnalités. Cela a plusieurs avantages. Tout d'abord, cela permet de faciliter l'identification des nouvelles fonctionnalités. D'autre part, cela permet qu'une modification associée à l'objet de base puisse se répercuter sur l'ensemble des objets, et ainsi d'éviter des erreurs de recopiage. **C'est pourquoi les métamodéleurs open source basés sur de la programmation orientée objet nous semblent les plus appropriés pour accompagner la conception des SELBC.**

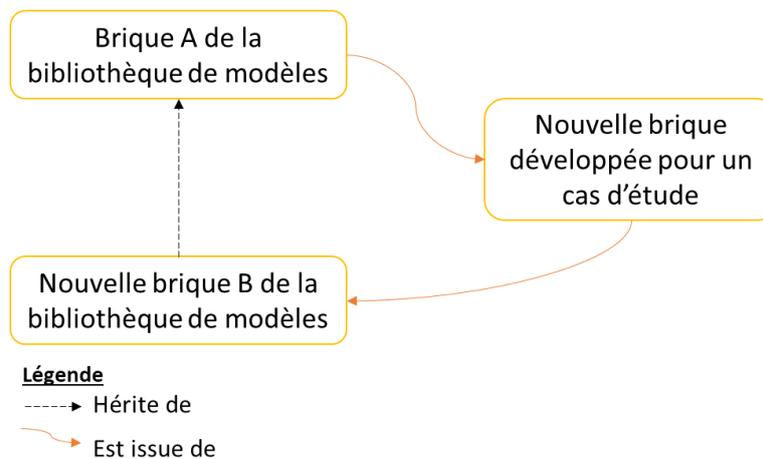


Figure 19 : Intérêt de la modélisation orientée objet : agrément de la bibliothèque à partir de cas d'études | Source : Auteure

II.1.iv Modifier et tester le modèle à de nombreuses reprises : outil d'optimisation MILP

Dans l'idée d'une négociation entre les parties prenantes, le modèle de l'assemblage socio-énergétique va généralement être soumis à des modifications conséquentes et régulières. Il est donc important que le modèle puisse être modifié et testé facilement. La bibliothèque de modèles permet de modifier simplement le modèle via deux entrées : conserver les mêmes briques de modèles en changeant les données d'entrée (cf. II.2.ii) ou encore changer de brique de modèles. Dans le second cas, nous considérons qu'il y a un changement d'assemblage.

Une fois les modifications réalisées, il est nécessaire de pouvoir tester le nouveau modèle pour vérifier qu'il existe au moins une solution, que ces solutions correspondent aux besoins, ou encore pour comparer les nouvelles solutions aux précédentes. Cependant, le nombre de variables est important, ce qui peut ralentir la résolution. En effet, étant en phase amont de projet, de nombreuses spécifications ne sont pas encore décidées (cf. II.2 pour les spécifications), ce qui d'un point de vue du modèle implique que de nombreuses variables restent encore libres (i.e. n'ont pas de valeur fixée). Le nombre de variables est d'autant plus important que le modèle devrait prendre en compte la phase de fonctionnement du système comme préconisé suite à la mise en exergue du premier paradoxe (cf. I.5.i). En effet, si une variable est dépendante du temps, l'outil considèrera en fait n variables dans le modèle (n correspondant au nombre de pas de temps de l'étude), augmentant rapidement le nombre de variables dans le modèle. Considérant un grand nombre de variables, il semble alors plus opportun d'utiliser des outils d'optimisation, plutôt que d'avoir recours à un outil de simulation. En effet, pour les outils d'optimisation, les variables sont fixées *a posteriori*, et de manière optimale, par le solveur, tout en répondant aux contraintes et objectifs de l'étude. Pour les outils de simulation, c'est au modélisateur de fixer les variables avant de lancer la résolution, qui permet alors par le calcul de simuler une évolution du système. Un outil de simulation est en fait un outil d'optimisation pour lequel on a fixé toutes les variables (Connolly et al. 2010). Par ailleurs, fixer les variables par les parties prenantes en amont peut ralentir grandement le processus de décision, sans que cela soit nécessaire, si l'étude est réalisée avec un outil d'optimisation. Il est possible d'identifier les variables optimales à l'aide d'un outil de simulation, mais cela nécessite de faire tourner de nombreuses fois la simulation en essai-erreur, « try and error ». Les calculs peuvent être longs et fastidieux, surtout dans le cas où le nombre de variables est important. **C'est pourquoi nous conseillons que la conception des SELBC s'appuie sur des métamodeleurs d'optimisation.**

Parmi les différentes formulations d'un modèle d'optimisation, la modélisation linéaire d'entiers mixtes (continus et entiers - incluant les nombres binaires), nommée en anglais Mixed Integer Linear Programming (MILP), nous semble la plus appropriée. En effet, étant en phase de pré-étude, un modèle macroscopique basé sur des calculs de bilans de flux linéaires (d'énergie, de puissance, de masse financières...) peut suffire. Dans le cas des SELBC, ce modèle macroscopique s'étend à l'échelle spatiale et à l'échelle temporelle. Pour l'échelle spatiale, le SELBC est constitué de plusieurs unités de consommation et/ou de production. Cela implique que le SELBC se situe à une échelle multi-logements, voire à l'échelle d'un quartier. Pour l'échelle temporelle, l'intermittence ayant un rôle important, il peut être nécessaire de modéliser de longs cycles de fonctionnement pouvant aller jusqu'à plusieurs années. Le pas de temps est alors choisi le plus grand possible pour limiter la taille du problème, mais assez petit pour conserver une certaine finesse nécessaire. Ces caractéristiques impliquent donc un grand nombre de variables et de contraintes pour le modèle, qui peut être rapidement résolu si la formulation est linéaire. De plus, pour un modèle plus proche de la réalité, par exemple l'état éteint ou allumé d'un système énergétique, il peut être intéressant de recourir à des variables binaires, en plus de variables continues, d'où l'intérêt d'une modélisation « mixte ». Comme le montre le Tableau 3, (Pajot 2019) met en évidence dans sa thèse le fait que la modélisation linéaire serait la plus adaptée, parmi les modélisation mixtes, pour une résolution rapide de modèles avec de nombreuses variables. **Pour résumer, les métamodeleurs d'optimisation MILP open source basés sur de la programmation orientée objet nous semblent les plus appropriés pour accompagner la conception des SELBC.**

Formulation	MILP	P-MILP	MINLP
Qualité du modèle	-	+	++
Rapidité de résolution / Capacité à traiter de gros problèmes	++	-	--
Facilité de modélisation	-	--	-

Tableau 3 : Tableau comparatif des approches mixtes : MILP, P-MILP et MINLP⁵⁰ | Source : (Pajot 2019)

II.1.v Synthèse des choix pour un outil d'aide à la conception adapté à la négociation et identification de plusieurs outils

Dans l'idée d'accompagner les parties prenantes dans la conception de SELBC, il nous semble nécessaire que le modèle soit support de négociation. Pour cela nous avons défini que le modèle devrait être, *a minima* :

- compréhensible pour les parties prenantes,
- accessible,
- adaptable aux besoins des parties prenantes, et
- modifiable à de nombreuses reprises et solvable rapidement pour comprendre les modifications appliquées.

Pour répondre à ces critères, nous avons mis en évidence que nous pouvions avoir recours à :

- **un métamodeleur proposant des briques de modèles,**
- **d'optimisation,**
- **MILP,**
- **open source,**
- **basé sur un langage orienté objet,**
- **avec une interface graphique et des notebooks associés.**

La cartographie des métamodeleurs d'optimisation identifiés est détaillée dans le Tableau 4 ci-dessous⁵¹ et résumée dans la Figure 20. Tous peuvent recourir à des notebooks.

⁵⁰ MILP : modèle linéaire d'entiers mixtes, P-MILP : projection d'un modèle non linéaire dans un formalisme MILP et MINLP : modèle non linéaire d'entiers mixtes.

⁵¹ Pour réaliser notre travail de cartographie de métamodeleurs nous avons travaillé à partir de la littérature scientifique existante. Notre démarche nous a amenée à identifier une série d'articles scientifiques réalisant des revues d'outils, de modèles, d'approches mathématiques et d'algorithmes de résolution pour les systèmes énergétiques. L'Annexe A présente, sous la forme d'un tableau, les articles identifiés et le type de la revue réalisée.

Nom (source)	Description du métamodeleur (issue de leur documentation) / Développeur	Optimisation Simulation	Langage de programmation / Modélisation	Licence / Commercial ou gratuit	Interface graphique
Artelys Crystal Energy Planner Page « Artelys Crystal Energy Planner »	Outil permettant d'optimiser la gestion opérationnelle à court et moyen terme des actifs de production énergétique. L'outil propose 50 modèles d'actifs énergétiques par défaut, et des possibilités de configuration, afin de prendre en compte des contraintes techniques, environnementales et contractuelles. / Artelys, France	Optimisation	Inconnu / MILP	Propriétaire / Commercial	Oui
DER-CAM « Distributed Energy Resources - Customer Adoption Model (DER-CAM) Building Microgrid »	Outil d'aide à la décision permettant d'identifier les investissements optimaux en matière de ressources énergétiques distribuée pour des bâtiments ou des micro-réseaux multiénergie. / Berkley lab, États Unis	Optimisation	GAMS / MILP	Propriétaire / Gratuit	Oui
Dimosim (Perez et al. 2016)	Plateforme de simulation dynamique bottom-up adressant la simulation énergétique bâtiment à différentes échelles. / Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), France	Simulation	Python (POO)	Propriétaire / Commercial	Oui
Ehub Modeling tool (Bollinger et Dorer 2017)	Ensemble de scripts Matlab permettant de créer, d'exécuter et de visualiser les résultats d'un modèle de plateforme énergétique (hub) pour une étude de cas donnée et un ensemble de technologies. / Urban Energy Systems Laboratory, Suisse	Optimisation	Mathlab, AIMMS, R / MILP	Code open source & outil propriétaire (Mathlab) / Commercial	

Nom (source)	Description du métamodeleur (issue de leur documentation) / Développeur	Optimisation Simulation	Langage de programmation / Modélisation	Licence Commercial ou gratuit	Interface graphique
Calliope (Pfenninger et al. 2013)	Outil permettant de construire des modèles de systèmes énergétiques, conçus pour analyser des systèmes avec une résolution spatiale et temporelle arbitrairement élevée, avec une formulation mathématique permettant des analyses allant de simples quartiers à des pays et continents. / ETH Zürich, Suisse et University of Cambridge, Angleterre	Optimisation	Python (POO) / MILP	Open source, licence contaminante GNU GLP3 / Gratuit	
HOMER Page « HOMER - Hybrid Renewable and Distributed Generation System Design Software »	Outil permettant d'optimiser la conception des micro-réseaux dans tous les secteurs, des services publics pour des villages et des îles, aux campus et bases militaires connectés au réseau. / National Renewable Energy Laboratory, États Unis et HOMER Energy society, État Unis	Simulation & Optimisation	Inconnu / Inconnu	Propriétaire / Commercial	Oui
Librairies Modelica : TransiEnt Library, modelica-ibpsa, BuildSysPro, MoMoUrEnSySi... (Schweiger et al. 2017)	Librairies pour modéliser des systèmes énergétiques (bâtiments, centrales, réseaux...). Divers développeurs	Simulation (possibilité d'optimisation avec quelques extensions ex : Optimica (Åkesson 2008))	Modélica (POO)	Open source pour OpenModélica sinon propriétaire	Oui (Dymola, OpenModelica)
Oemof (S. Hilpert et al. 2018)	Outil open source modulaire pour modéliser les systèmes d'approvisionnement en énergie. / ZNES, Allemagne	Optimisation	Python (POO) / MILP et autres	Open source, contaminante GNU GPL3 / Gratuit	

Nom (source)	Description du métamodeleur (issue de leur documentation) / Développeur	Optimisation Simulation	Langage de programmation / Modélisation	Licence Commercial ou gratuit	Interface graphique
OMEGAAlpes (Pajot et al. 2019)	Outil de modélisation de systèmes énergétiques et d'assemblages socio-énergétiques basé sur de l'optimisation MILP. / G2Elab, France	Optimisation	Python (POO) / MILP	Open source non contaminante Apache 2.0 / Gratuit	Oui, développée dans le cadre de cette thèse (cf. III.4.ii)
REopt (Cutler et al. 2017)	Outil permettant d'optimiser la taille et la stratégie d'exploitation des micro-réseaux, du stockage et des systèmes d'énergie et d'eau. / National Renewable Energy Laboratory, États Unis	Optimisation	Inconnu / MILP	Propriétaire / Commercial Version REopt lite gratuite	Oui, via le site web
TEASER (Remmen et al. 2018)	Plateforme open source pour la modélisation énergétique urbaine des bâtiments. RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, Allemagne	Simulation	Python (POO)	Open source, non contaminante MIT License / gratuit	Oui
TRNSYS Page « TRNSYS, logiciel de simulation thermique des bâtiments et des systèmes »	Programme de simulation de systèmes transitoires pour la simulation énergétique des processus solaires, l'analyse des bâtiments, l'énergie thermique, etc. Thermal Energy System Specialists, LLC, États Unis	Simulation	FORTTRAN (POO possible)	Propriétaire / Commercial	Oui

Tableau 4 : Tableau de comparaison des métamodeleurs | Source : Auteure

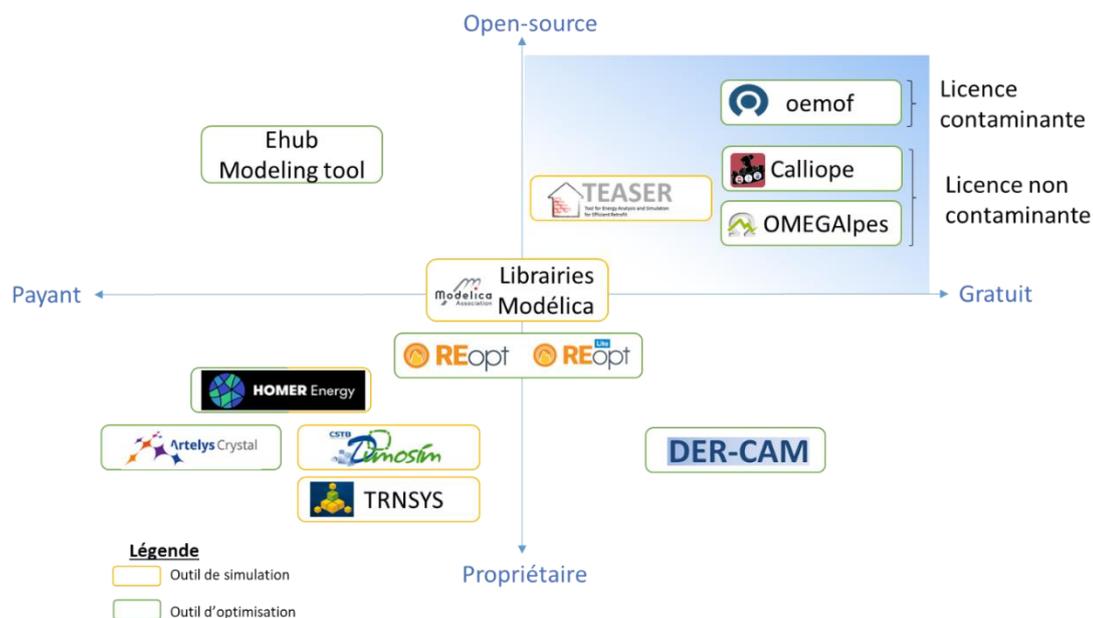


Figure 20 : Répartition des métamodeleurs en fonction de leur caractéristique d'accès | Source : Auteure

Quelques métamodeleurs répondent aux quatre critères ci-dessus (excepté l'interface graphique). Nous avons identifié Calliope (Pfenninger et al. 2013), oemof-Solph (S. Hilpert et al. 2018) ou encore OMEGAlpes (Pajot 2019). Tous trois sont basés sur le langage orienté objet Python. Oemof propose des unités énergétiques de base à compléter à partir des composants disponibles dans la librairie, et quelques unités spécifiques telles que le stockage ou la cogénération. La licence contaminante⁵² GNU GPL3 est associée à oemof, ce qui implique que tout développement doit devenir open source. OMEGAlpes propose plutôt des unités énergétiques préconstruites intégrant des paramètres, contraintes et objectifs prédéfinis. La licence non contaminante Apache 2.0 est associée. Tous deux ont été développés au cours de la même période. Calliope, plus ancien, modélise principalement les coûts de conception et de gestion des systèmes énergétiques. Cependant, ces trois outils ne disposent pas d'interface graphique (au début de la thèse, car nos travaux nous ont amenés à en proposer une pour OMEGAlpes (cf. III.4.ii)).

Les outils identifiés se basent tous les trois sur une modélisation MILP. **La partie suivante présente les entrées d'un modèle d'optimisation de type MILP et propose de concevoir ces entrées comme des objets de discussion et de négociation.**

⁵² Une licence contaminante implique que toute production basée sur l'objet licencié doit conserver la même licence.

II.2 Les entrées du modèle d'optimisation MILP comme objets de discussion ou de négociation

S'intéressant à la conception optimale des machines électriques, (Stéphane Brisset 2007) décrit une conception itérative et non linéaire (cf. Figure 21). Il met en évidence des itérations nécessaires entre les quatre phases de la conception pour obtenir un modèle permettant d'identifier des solutions satisfaisantes pour les acteurs. Les deux plus longues boucles (verte et rose) nous permettent d'identifier quatre objets sur lesquels le concepteur est amené à s'interroger : le modèle avec les objectifs et les contraintes qui le constituent ainsi que les solutions calculées. Une solution correspond à l'ensemble des variables optimales calculées. Dans un contexte multipartite prenante, ces objets deviennent de possibles scènes de négociation. La boucle la plus courte (violette) concerne plus particulièrement les algorithmes de résolution que nous n'étudions pas dans le cadre de cette thèse.

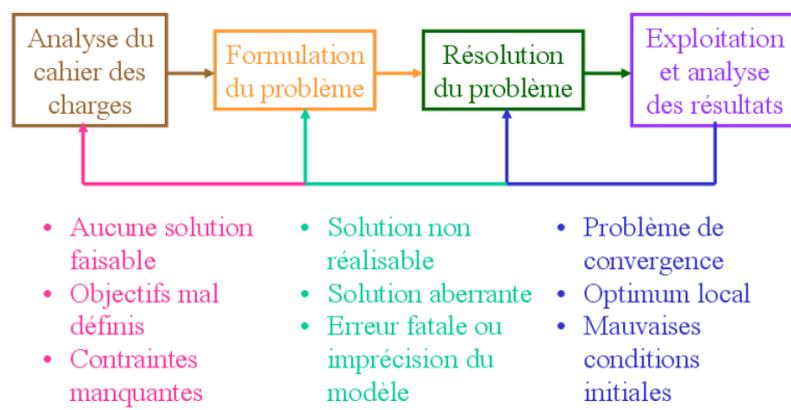


Figure 21 : Itérations possibles lors de la conception | Source : (Brisset 2007)

La partie précédente a mis en évidence notre intérêt pour les métamodéleurs d'optimisation basés sur une modélisation MILP pour accompagner la négociation. L'optimisation vise à définir par le calcul les valeurs des variables à partir des données, des contraintes et des objectifs constitutifs du modèle. **Cette partie vise à identifier comment les entrées du modèle d'optimisation MILP peuvent devenir des objets de discussion ou de négociation.** Les entrées d'un problème d'optimisation (avec contraintes) sont les suivantes (cf. Figure 22) :

- Les variables du modèle à optimiser (minimiser ou maximiser⁵³) (II.2.i). Elles peuvent être continues (composant le vecteur x) ou entières (binaires incluses - composant le vecteur y). La particularité de nos problèmes d'optimisation est qu'ils sont composés d'un très grand nombre de variables à identifier simultanément.

⁵³ Maximiser une fonction revient à minimiser l'opposé de la fonction.

- Les bornes des variables, définissant les extrema des valeurs possibles des variables (II.2.i.b). Elles sont prédéfinies au sein de l'outil⁵⁴, assez grandes pour que les valeurs des variables puissent être réalistes, assez petites pour optimiser le temps de recherche. Elles ne sont donc pas négociées par les acteurs.
- Les données du modèle (II.2.ii), fournies ou choisies par les parties prenantes (ou par le modélisateur).
- Les contraintes (II.2.iii), formulées par les parties prenantes ou le modélisateur. Elles limitent les valeurs possibles des variables.
- Les objectifs (II.2.iv), formulés par les parties prenantes, visant à minimiser ou maximiser une ou plusieurs variables. Dans le cadre de la formulation MILP, ils sont regroupés en une unique fonction-objectif.

Les sous-parties suivantes identifient la manière dont les entrées du modèle peuvent être objets de négociation.

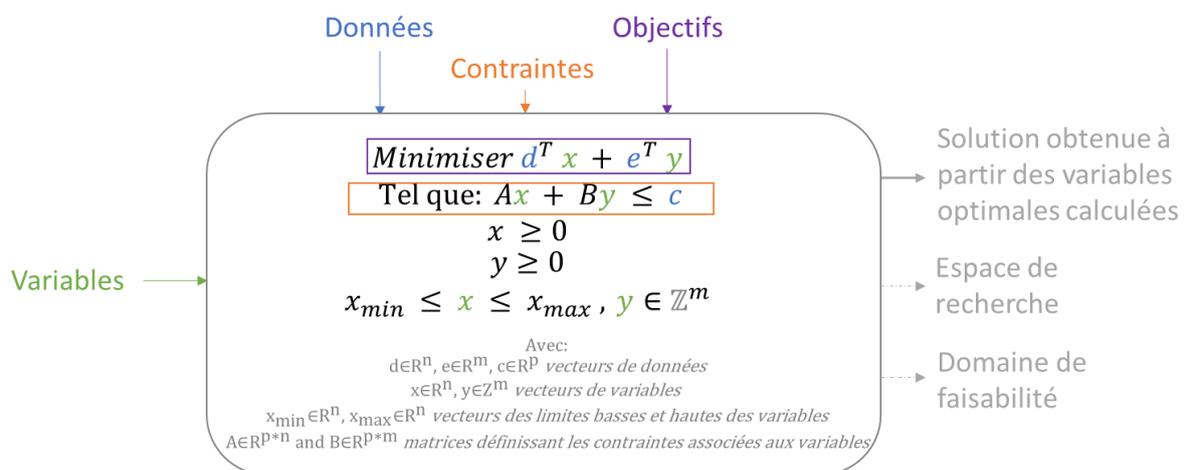


Figure 22 : Formulation générique d'un problème d'optimisation MILP et les entrées (et les sorties) associées discutées par les parties prenantes | Source : Auteure

II.2.i Les variables et l'espace de recherche, points clefs de l'optimisation

Commençons par les variables qui sont le point central de l'optimisation. Le rôle de l'optimisation est de calculer des valeurs optimales pour ces variables. La première étape consiste à identifier, par les parties prenantes, les grandeurs qui seront les variables du modèle. Pour mieux comprendre les différents types de variables qui permettent de modéliser un SELBC nous les rappelons dans une première section (II.2.i.a). L'ensemble des valeurs possibles de ces variables forment l'espace de recherche que nous présentons plus en détail dans la seconde sous-partie (II.2.i.b). Nous avons choisi

⁵⁴ Les bornes des variables peuvent parfois être définies par les données d'entrée. Cependant, nous préférons que les données d'entrées ne soient pas directement associées aux bornes des variables, mais ajoutées comme contraintes pour permettre les négociations.

de représenter l'espace de recherche afin d'accompagner les acteurs sur la compréhension des valeurs possibles pour les variables. Les valeurs optimales des variables sont fixées à l'étape de résolution. Nous ne considérons l'étape de résolution comme une étape de négociation, puisque les acteurs n'interviennent pas.

II.2.i.a Typologies de variables

Nous distinguons trois types de variables : les variables de dimensionnement, les variables de commande et les variables d'état. Les variables de dimensionnement sont les variables correspondant au dimensionnement du système. Dans le cadre d'un SELBC il peut être question de dimensionner l'unité de production. Les variables de dimensionnement peuvent alors être la puissance maximale de l'unité ou le nombre maximal de panneaux photovoltaïques. Les variables de commande sont des variables qui permettent de piloter le système. Il peut par exemple s'agir de la puissance de production du système à chaque pas de temps. Enfin, les variables d'état correspondent à l'état du système à chaque instant. Leur valeur évolue dans le temps en fonction des paramètres du système. L'état d'un stockage à chaque instant, ou encore la température du logement, sont des variables d'état. Dans le cadre de la simulation les variables de dimensionnement et de commande sont fixées par le modélisateur, il s'agit alors de calculer les variables d'état. Du point de vue de la négociation, les parties prenantes peuvent choisir les variables qui seront laissées libres et celles qui seront finalement fixées par une valeur.

Par ailleurs, cherchant à considérer les différents types de variable, nous avons mis en évidence, dans la partie précédente, l'intérêt d'une modélisation MILP afin de proposer des modèles plus proches du fonctionnement des systèmes énergétiques. Cela implique que les variables puissent être continues ou discrètes (entières ou binaires). Ainsi la variable correspondant à la puissance maximale de l'unité sera sûrement modélisée comme une variable continue, et la variable correspondant au nombre maximal de panneaux photovoltaïques sera modélisée comme entière. Il est cependant à noter que l'utilisation d'une modélisation MILP incite parfois à aller trop tôt vers des problèmes discrets. Cette démarche peut être contre-productive, car l'utilisation de variables discrètes, et donc la discrétisation du problème, augmente en complexité la formulation du problème et surtout les temps de résolution. Or, une résolution rapide du problème permet de tester à de nombreuses reprises la modélisation, ce que nous nous avons identifié comme essentiel dans le cadre d'un projet multipartite prenante (cf. II.1.iv). Pour répondre à ce problème, (F. Wurtz, Kuo-Peng, et Carvalho 2012) **proposent alors de choisir au départ une modélisation basée sur des variables continues, bien que cela rend le modèle « imaginaire »**, i.e. non réaliste. Les parties prenantes sont alors amenées à choisir *a posteriori* de l'optimisation, une valeur correspondant à une solution « existante ». Il s'agirait donc de modéliser le nombre de panneaux photovoltaïques comme une variable continue. Dans un cas où la valeur optimale serait de 12,5 panneaux, ce serait aux parties prenantes de choisir entre 12 et 13 panneaux à installer. Nous proposons dans le chapitre suivant un développement associé à cette démarche et visant à garder une optimisation rapide (cf. III.2).

Du point de vue de la négociation, le recours à des briques de modèles préconstruites implique que les variables sont prédéfinies dans le modèle. Ainsi le type de variable (continue, entière, binaire), les bornes (minimales ou maximales) ou la valeur de la variable peuvent être prédéfinis. **Dans un contexte de négociation, il nous semble nécessaire de réduire au minimum les valeurs prédéfinies et de**

permettre aux acteurs de définir par eux-mêmes ces valeurs, via les données d'entrée du modèle pendant l'étape de modélisation (cf. II.2.ii). De plus, il pourrait être intéressant que les acteurs s'accordent sur les variables qui leur semblent importantes. (Pajot 2019) parle de « variable d'intérêt ».

II.2.i.b L'espace de recherche basé sur les valeurs possibles des variables

L'ensemble des valeurs possibles pour les variables forme l'espace de recherche. La Figure 23 représente l'espace de recherche dans le cas d'un problème à deux variables x_1 et x_2 . Les deux variables ont des bornes minimales et maximales, qui sont des paramètres prédéfinis au sein de l'outil (l'infini n'existant pas dans les outils). On peut également remarquer sur le schéma la solution optimale identifiée pour la maximisation des deux variables. Cette solution optimale appartient à l'espace de recherche, mais n'est qu'une solution parmi d'autres possibles.

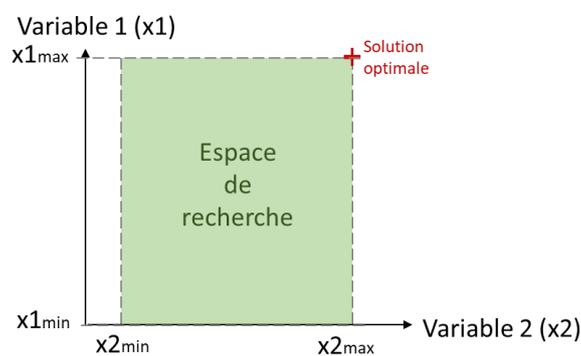


Figure 23 : Représentation d'un espace de recherche à deux variables | Source : Auteure

Si l'espace de recherche est nul, cela signifie que le modèle ne prend pas en compte de variable ou que les bornes des variables ne sont pas bien définies. Dans le premier cas, il faut revenir sur la définition des variables, et donc sur le choix des briques de modèle. Dans le second cas, ces bornes de variables sont définies au sein de l'outil : c'est donc un problème de modélisation lié à l'outil et non aux parties prenantes.

II.2.ii Les données du modèle comme objet de discussion

Les modèles sont également composés de données qui permettent de définir les composantes du modèle (variables, fonctions-objectif, contraintes - cf. Figure 22). Ainsi, la puissance maximale d'une unité de production peut être définie par une donnée d'entrée. Il nous semble intéressant de noter que deux types de données d'entrée peuvent être mises en évidence (Stéphane Brisset 2007)⁵⁵:

- des données dont les valeurs sont connues selon le contexte d'étude. Dans le cas d'un projet de valorisation de chaleur fatale dont l'industrie est déjà en fonctionnement. Dans ce cas, on connaît la puissance maximale de la production.

⁵⁵ (Stéphane Brisset 2007) parle de « paramètres d'entrée ».

- **des données dont les valeurs ne sont pas connues *a priori* mais choisies par le modélisateur ou les parties prenantes.** Dans le cas d'un projet de valorisation de chaleur fatale n'ayant pas encore de solution de stockage, il peut s'agir d'un volume maximal du stockage choisi par les acteurs. **Ce sont donc ces données qui peuvent être discutées entre les parties prenantes.**

II.2.iii Les contraintes du modèle comme objet de négociation

Les modèles sont également composés de contraintes. Nous considérons une contrainte comme une relation (sous forme d'équation) qui réduit le champ des possibles et des possibilités de l'assemblage socio-énergétique. Nous identifions plusieurs catégories de contraintes que nous présentons dans une première sous-partie (II.2.iii.a). Mathématiquement, l'ajout d'une contrainte dans un modèle limite les valeurs possibles pour des variables mentionnées par la contrainte. Prenons pour exemple une contrainte, que nous nommons Cst2. Cette contrainte, décrite par l'équation (1) et représentée sur la Figure 24, impose que les valeurs des variables x_1 , x_2 soient choisies telles que la somme de ces variables est inférieure à la valeur de c .

$$cst2: x_1 + x_2 \leq c$$

Avec :

$x_1, x_2 \in \square$ deux variables

$c \in \square$ donnée d'entrée

(1)

L'ajout de contraintes dans le modèle amène à considérer un nouvel espace constitué des valeurs possibles pour les variables : le domaine de faisabilité. Celui-ci se base sur le domaine de recherche qu'il réduit en fonction des contraintes ajoutées au modèle (cf. Figure 24). La Figure 24 permet d'imaginer graphiquement, à l'aide d'une flèche, comment la contrainte Cst1 peut réduire le domaine de faisabilité selon la valeur maximale imposée à la variable x_1 . Si le problème est sur-contraint, alors le domaine de faisabilité est nul, entraînant la nécessité d'identifier ces contraintes problématiques (II.2.iii.b) ou la nécessité de changer d'assemblage (II.2.iii.c), comme nous le détaillerons après avoir présenté les différentes typologies de contraintes.

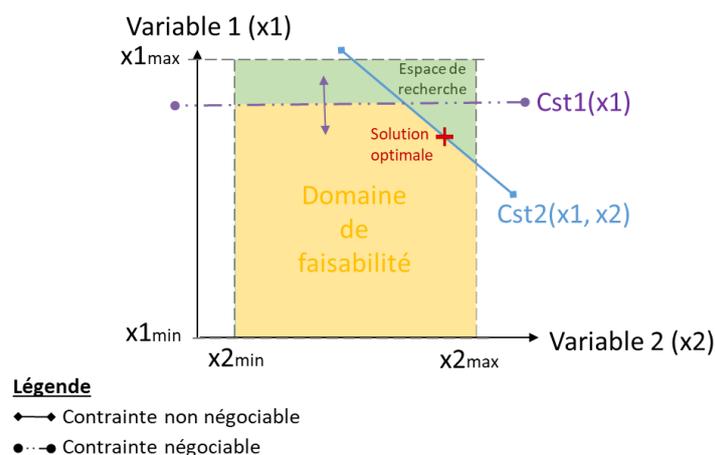


Figure 24 : Représentation du domaine de faisabilité défini par les contraintes au sein de l'espace de recherche | Source : Auteure

II.2.iii.a Typologie de contraintes et degré de négociation

Cette sous-partie met en évidence que les contraintes peuvent être de types différents, avec des degrés de négociation plus ou moins important :

- Il existe les contraintes non négociables. Il s'agit de contraintes de définition et de contraintes physiques qui ne peuvent donc pas être négociées. Nous entendons par contrainte de définition une relation mathématique imposée reliant les variables entre elles. Il peut s'agir de calculer l'énergie totale e_{tot} comme étant le produit entre la somme des puissances p à chaque pas de temps et le pas de temps comme présenté dans l'équation (2).

$$e_{tot} = \sum_{t \in \text{période étudiée}} p[t] * \Delta t \quad (2)$$

- Il existe les contraintes *a priori* peu négociables. Il s'agit de contraintes techniques, qui sont *a priori* peu négociables, à moins de changer de système technique. Il peut s'agir par exemple du fait qu'une centrale de production ne puisse pas s'allumer instantanément, mais selon une rampe d'allumage. La puissance à l'instant $t+1$ se calcule par rapport à la puissance à l'instant précédent, considérant la pente de la rampe comme le présente mathématiquement l'équation (3).

$$p[t+1] - p[t] \leq 200 \text{ W} \quad (3)$$

- Il existe les contraintes *a priori* négociables. Il s'agit des contraintes liées aux parties prenantes (cf. V.3), qui sont *a priori* négociables, car décidées par ces dernières. On peut penser par exemple à des plages horaires restreintes pour l'utilisation de certains appareils domestiques, comme par exemple le fait de ne pas lancer de machine à laver le linge entre 17h et 23h, car cette dernière gène. La puissance du lave-linge doit donc être imposé à 0 sur ces horaires comme le présente l'équation (4).

$$\sum_{t=17h}^{23h} p_{lave_linge}[t] = 0 \quad (4)$$

Il serait donc intéressant de distinguer dans le modèle les contraintes non négociables des contraintes négociables, avec plusieurs degrés de négociation possibles, pour amener les parties prenantes à se concentrer sur les contraintes négociables, si besoin est. Nous présentons un développement le permettant dans le chapitre suivant (cf. III.3.i).

II.2.iii.b Problème sur-contraint : nécessité d'identifier les contraintes pour pouvoir les négocier

Si les contraintes ne sont pas compatibles les unes avec les autres, il est possible que le modèle d'un assemblage socio-énergétique n'ait pas de solution, c'est à dire que le domaine de faisabilité soit réduit à zéro. On parle de problème sur-contraint.

Si une contrainte est trop restrictive, elle réduit le domaine de faisabilité à un espace vide. Ce cas n'est pas anecdotique pour les projets intégrant plusieurs parties prenantes en phase de pré-études. En effet, dans ces conditions, les parties prenantes sont souvent amenées à imposer, au départ, des contraintes fortes. Il est alors nécessaire de s'orienter vers la négociation de contraintes (avant même de discuter des objectifs). **Pour cela, il faudrait identifier les contraintes qui rendent le problème sur-contraint. Et parmi celles-ci, il faudrait pouvoir identifier celles qui sont négociables, dans le but de pouvoir les modifier selon les besoins du projet et des parties prenantes, afin d'obtenir *a minima* un domaine de faisabilité non nul.** Un développement le permettant est présenté dans le chapitre suivant (cf. III.3.ii et III.3.iii).

II.2.iii.c Problème sur-contraint : changement d'assemblage

Une autre possibilité peut être de changer d'assemblage, i.e. de changer de solution socio-énergétique envisagée. Il pourrait par exemple s'agir d'ajouter un stockage dans le modèle, créant ainsi un nouvel assemblage. Changer d'assemblage permet de changer de domaine de recherche et donc de domaine de faisabilité. Ainsi, l'ajout d'un stockage peut permettre que le domaine de faisabilité ne soit plus vide, si l'ajout du stockage permet de répondre à l'ensemble des contraintes du modèle. **Nous pensons qu'un changement d'assemblage n'a pas à être intégré dans les métamodeleurs et que cette démarche doit être portée par les modélisateurs.** En revanche, l'intérêt de travailler avec un métamodeleur est que la construction de nouveaux assemblages est facilitée, car le modèle n'a pas besoin d'être reconstruit de zéro. Il s'agit simplement d'échanger quelques briques du modèle.

II.2.iv Les objectifs du modèle comme objet de discussion

Les modèles sont également composés d'un ou plusieurs objectifs. Un objectif est pour nous une orientation (maximiser ou minimiser) de variables tendant à déplacer le point de convergence calculé au sein du domaine de faisabilité. La direction relève d'une intention ou volonté d'un acteur.

Considérant un projet multipartie prenante avec des opinions différentes (parfois divergentes), la modélisation est principalement multiobjectif⁵⁶. Un poids peut être associé aux objectifs, rendant l'objectif pondéré plus (si le poids est plus élevé) ou moins (si le poids est moins élevé) influant que les autres objectifs.

L'équation (5) présente un objectif visant à minimiser deux variables x_1 et x_2 . L'ensemble des solutions répondant à cet objectif, ainsi qu'un exemple de solution optimale identifiée, sont représentés sur la Figure 25.

⁵⁶ En revanche, les objectifs sont rassemblés en une seule fonction-objectif lors de l'étape de résolution.

$$\text{Maximiser } x_1 + x_2$$

Avec :

(5)

$x_1, x_2 \in \square$ deux variables

Du point de vue de la négociation, les objectifs orientant les valeurs optimales des variables, mais ne réduisant pas le domaine de faisabilité, ceux-ci peuvent être cumulés sans impacter le domaine de faisabilité. **Il n’y a donc pas un besoin de négociation entre les parties prenantes pour les objectifs, mais le choix doit être fait avec attention.** De plus, le poids des objectifs peut être discuté. Nous considérons qu’en phase de pré-étude, il n’est pas nécessaire de s’attacher à discuter le poids des objectifs, l’intérêt étant principalement d’identifier qu’il existe au moins une solution répondant aux besoins des parties prenantes.

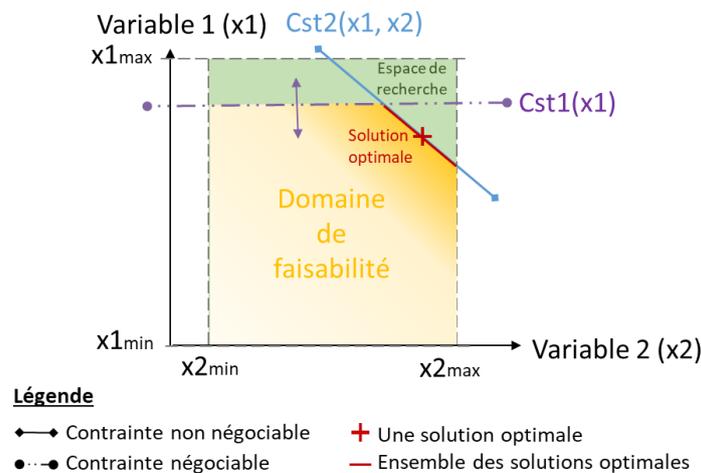


Figure 25 : Représentation de l'orientation de l'objectif Maximiser x_1+x_2 dans le domaine de faisabilité ainsi que des solutions optimales identifiables | Source : Auteure

II.3 Les solutions du modèle comme objet de négociation

Au-delà des entrées du modèle, nous pouvons nous interroger sur la négociation des sorties. La résolution d’un problème MILP identifie généralement une unique solution, s’il en existe au moins une. Cependant, nous considérons que cette démarche ne permet pas de négociation, puisqu’une unique solution est identifiée. Il nous semble donc nécessaire que les outils d’aide à la conception multiacteur puissent présenter un ensemble de solutions. (Lund et al. 2017) mettent en évidence l’importance de pouvoir identifier plusieurs solutions afin que les parties prenantes puissent avoir une marge de manœuvre pour décider. Il affirme que les outils d’optimisation ne sont originellement pas construits pour identifier plusieurs solutions.

Cette partie met en évidence des moyens d’identifier plusieurs solutions, via les outils d’optimisation, afin que ces solutions puissent être discutées. Une première méthode largement utilisée est le concept de front de Pareto (II.3.i). Cependant, le front de Pareto ne permet de comparer que des solutions d’un même modèle. C’est pourquoi il peut également être intéressant de comparer plusieurs fronts de Pareto calculés pour plusieurs modèles (II.3.ii).

II.3.i Discuter des solutions « optimales » sur un même modèle : identification du front de Pareto

Le front de Pareto est actuellement largement utilisé pour la négociation de solutions. Le front de Pareto regroupe les solutions dites optimales pour l'ensemble des variables (aussi appelées critères) prises en compte. Ces solutions respectent bien entendu les contraintes modélisées. (Recht 2016, 68) parle dans sa thèse de « solution « Pareto optimale » ou non dominée au sens de Pareto ». « Une solution **a** domine, au sens de Pareto, une solution **b** si et seulement si :

- la solution **a** est au moins aussi bonne que la solution **b** sur tous les critères ;
- la solution **a** est meilleure que la solution **b** sur au moins un critère ».

Formulé autrement, le front de Pareto correspond alors à l'ensemble des solutions non dominées d'un problème multicritère (Deb 2001). La Figure 26 représente le front de Pareto correspondant aux variables x_1 et x_2 maximisées (cf. objectif de l'équation (5)). La solution A appartient au front de Pareto car $x_2(A)=x_{2max}$ et $x_1(A)$ est maximale pour cette valeur. La solution B appartient également au front de Pareto, car même si $x_2(A)>x_2(B)$, on a $x_1(B)>x_1(A)$. Cependant, la solution C est dominée. En effet, elle est dominée par A car $x_2(C)=x_2(A)$ et $x_1(C)<x_1(A)$. On retrouve la définition de la solution dominée au sens de Pareto : la solution A est au moins aussi bonne que la solution C sur le critère x_2 , et la solution A est meilleure que la solution C sur le critère x_1 .

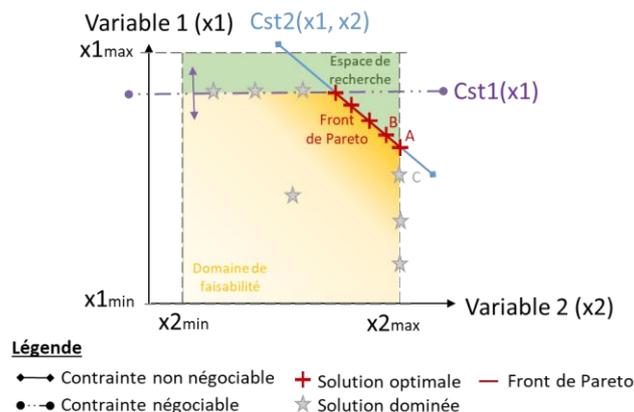


Figure 26 : Représentation graphique de solutions dominées (dont C) et d'un front de Pareto formé par des solutions optimales (dont A et B) | Source : Auteure, inspirée de (Recht 2016, 69)

La Figure 26 permet aussi de représenter l'impact des contraintes sur le front de Pareto. Plus la contrainte Cst1 impose une valeur faible de x_1 , plus le front de Pareto sera petit et inversement.

Un développement permettant de calculer un front de Pareto automatiquement à partir d'un métamodèle est présenté dans le chapitre suivant (cf. III.5).

II.3.ii Discuter des solutions optimales sur plusieurs modèles : comparer des fronts de Pareto

Si plusieurs assemblages, i.e. plusieurs solutions socio-énergétiques, sont envisagées, il peut être intéressant de comparer les assemblages entre eux. (Albert 2004, 113) compare ainsi dans sa thèse des fronts de Pareto associés à deux types d'alternateurs avec des bobinages différents. Dans la Figure

27, la comparaison des deux fronts de Pareto montre qu'une technologie (nous pourrions parler d'un assemblage) peut dominer une autre technologie (un autre assemblage) sur les variables observées. Ainsi la technologie de bobinage en épingles à un meilleur rendement pour une masse plus faible. Ce constat peut amener les parties prenantes à choisir une solution sur le front de Pareto dominant. Dans d'autres cas, les fronts de Pareto peuvent se croiser, amenant les parties prenantes à choisir une solution dans les zones où les fronts de Pareto sont dominants.

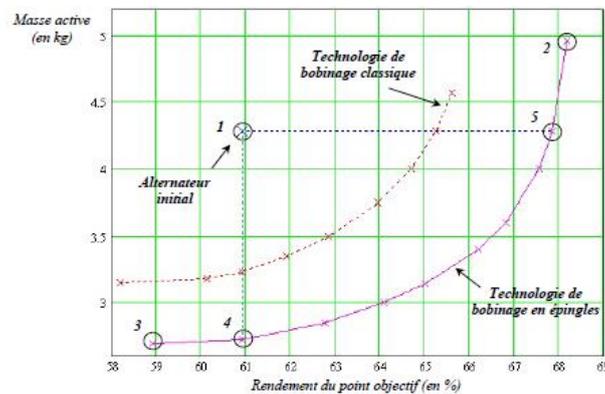


Figure 27 : Comparaison de deux fronts de Pareto pour deux technologies d'alternateurs différentes | Source : (Albert 2004, 113)

II.4 Les représentations comme support de synchronisation cognitive

Nous avons vu dans la partie précédente comment les entrées et sorties d'un modèle pouvaient être supports de négociation. Cependant, pour pouvoir entamer les négociations il faut pouvoir se comprendre. En effet, le deuxième paradoxe met également en évidence ce besoin. Pour assurer une mutuelle compréhension, il serait essentiel d'établir un référentiel commun. Ce chapitre présente le modèle comme un support de négociation. Cependant, il est certain que la compréhension du modèle, sous forme de code, n'est pas toujours accessible pour l'ensemble des parties prenantes. C'est pourquoi il nous semble préférable d'avoir recours à des représentations graphiques pour la discussion. Il nous semble donc important de proposer des représentations pour le modèle (II.4.i) et également pour les solutions (II.4.ii).

II.4.i Représentation du modèle

Si chaque acteur cherchait à fournir sa propre représentation du SELBC, chaque représentation serait différente. (Marie 2019) met en évidence que les représentations sont différentes selon si elles sont réalisées par des ingénieurs ou par des architectes. En effet, les représentations visent à répondre à des besoins qui sont différents selon les acteurs. Cette analyse pourrait être étendue à l'ensemble des acteurs. Cependant, dans l'idée d'une synchronisation cognitive, il nous semble important de proposer une représentation commune aux acteurs.

Plusieurs représentations ont pu être identifiées et notamment les représentations UML (II.4.i.a), la représentation RES (II.4.i.b). (Pajot 2019) propose également un formalisme pour modéliser les projets dans le cadre du métamodèle OMEGAAlpes (II.4.i.c). L'idée serait de représenter l'ensemble des éléments d'entrée décrits dans la partie II.2. Selon (Darses 2009), il faut alors que les représentations soient « des objets ouverts non complètement prescriptifs ».

La représentation Unified Modeling Language (UML) est une représentation largement utilisée dans la modélisation. Le langage UML est considéré comme un métalangage permettant de construire graphiquement un modèle. La représentation UML 2.0 différencie treize types de diagrammes répartis en deux groupes : les diagrammes statiques (structurels) et les diagrammes dynamiques (comportementaux)⁵⁷. Dans notre cas, cherchant à modéliser l’assemblage d’un SELBC, et non son évolution, les diagrammes statiques nous semblent les plus appropriés. Parmi les six diagrammes statiques (El Beqqali 2010), nous en retenons deux qui nous semblent être intéressants pour la représentation d’un assemblage socio-énergétique :

- Le diagramme de classes, qui permet de représenter l’architecture du système et les liens entre les différentes classes. Cette représentation est illustrée sur un SELBC, un projet d’autoconsommation collective, dans la Figure 28.
- Le diagramme d'objets qui permet de représenter les différents objets (instances des classes) du système. Ainsi, si une classe a deux instances, deux objets sont représentés comme c’est le cas pour les unités de consommation dans la Figure 29.

(Anastasia Roth 2019, 20-23) utilise dans sa thèse le formalisme UML pour modéliser les systèmes énergétiques et leur conception. Elle présente le diagramme de composants, le diagramme de classes, le diagramme d’objets, le diagramme de cas d’utilisation, et le diagramme d’activités. Elle retient le diagramme des classes pour modéliser ce qu’elle appelle le « système global », qui cherche à être encore plus large que l’assemblage socio-énergétique que nous proposons.

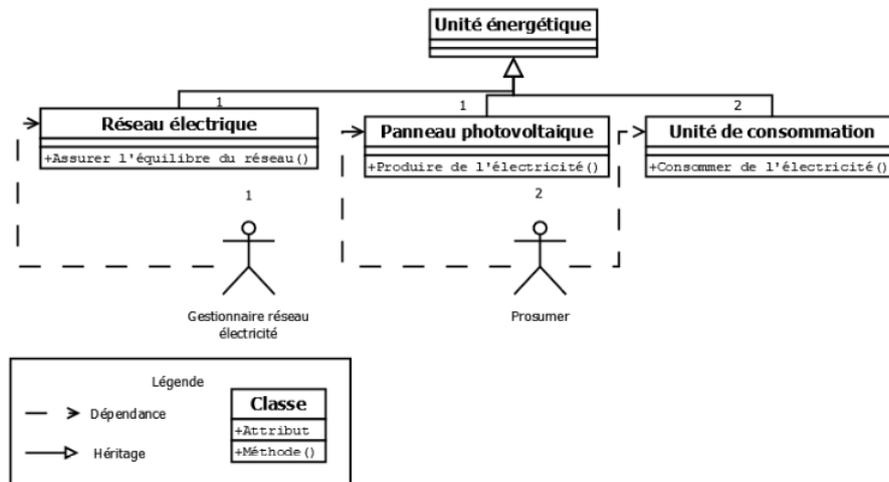


Figure 28 : Diagramme de classes associé à un projet d'autoconsommation collective | Source : Auteure

⁵⁷ Audibert, Laurent, page « UML 2 - de l’apprentissage à la pratique », *Developpez.com*, consultée en septembre 2020, <http://laurent-audibert.developpez.com/Cours-UML/>.

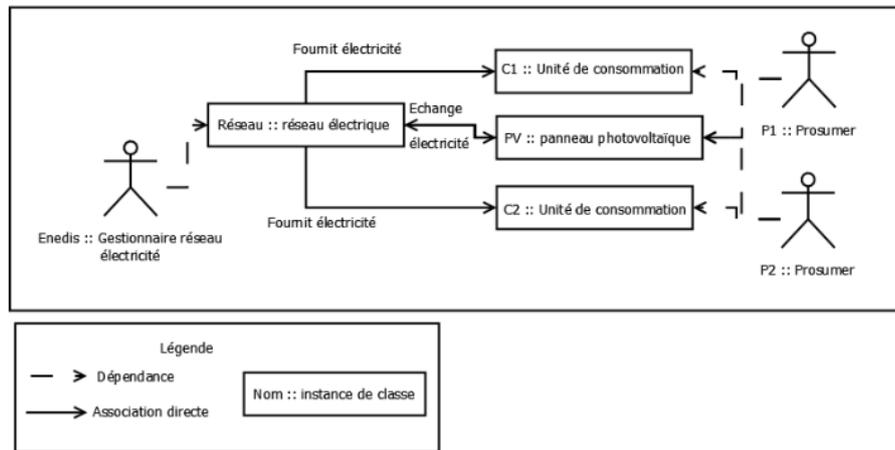


Figure 29 : Diagramme d'objets associé à un projet d'autoconsommation collective | Source : Auteure

II.4.i.b Referenced Energy System

Une seconde représentation connue pour les systèmes énergétiques est la représentation Referenced Energy System (RES). Selon (Bhattacharyya et Timilsina 2010), l'approche est développée par (Hoffman et Wood 1976). Elle est utilisée au sein des outils MARKAL. De nombreux articles utilisent aujourd'hui cette représentation pour présenter le système énergétique modélisé (Howells et al. 2005; Yue et al. 2018). Cette représentation est basée sur trois éléments :

- Les vecteurs énergétiques et émissions, appelées commodités, qui apparaissent sous formes de traits verticaux.
- Les systèmes de production énergétique, de stockage ou encore de transport, représentés sous forme de boîte.
- Les flux reliant les commodités aux systèmes représentés sous forme de flèche.

Imports / Apports

Demande

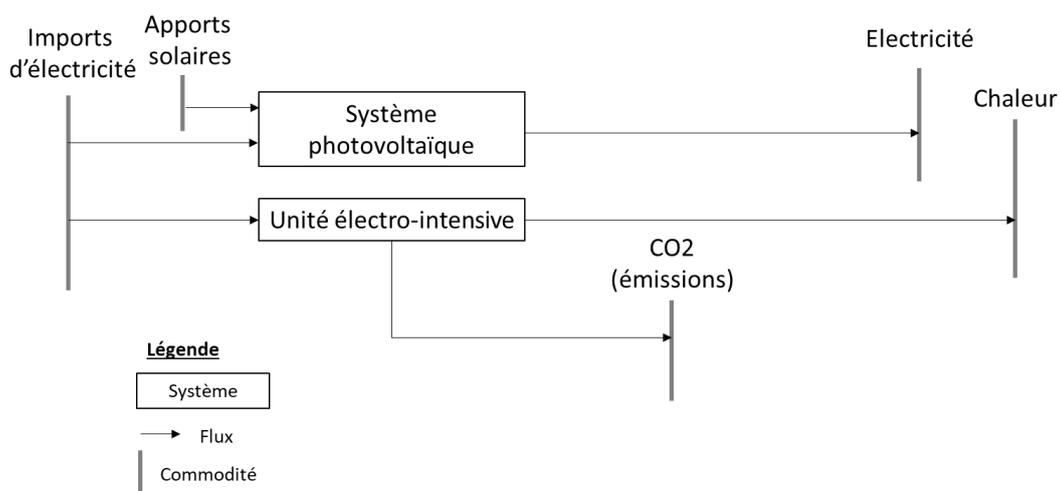


Figure 30 : Représentation RES d'un système énergétique | Source : Auteur

Comme nous l'avons mis en évidence dans le premier chapitre, la consommation ne devrait plus être considérée comme une demande à laquelle il faut répondre. En effet, cette dernière peut être flexible. La représentation proposée ne nous semble donc pas refléter le potentiel des SELBC. Il faudrait plutôt associer les consommations à des « systèmes » (sous forme de boîte) et non à des commodités (sous forme de trait). De plus, les contraintes et les objectifs du problème ne sont pas représentés.

II.4.i.c Représentation graphique « élémentaire » proposée par Pajot

Dans sa thèse, (Pajot 2019) propose une représentation graphique « élémentaire » permettant de représenter le modèle du système technique. A l'instar des représentations UML et RES, les unités énergétiques sont représentées sous forme de boîte. Cependant, (Pajot 2019) propose de différencier les unités énergétiques de plusieurs manières (cf. Figure 31). Une première différenciation est le vecteur énergétique : jaune pour le gaz, rouge pour l'énergie thermique et bleu pour l'électricité. Une seconde différenciation est la caractéristique de l'unité énergétique représentée par un symbole : un triangle avec une barre fixe sous le triangle si la consommation est fixe, avec une flèche si la consommation est variable, deux triangles en forme de papillon pour le stockage. Une troisième différenciation est la place de ce symbole : à gauche pour la consommation d'énergie, à droite pour la production. De plus, il s'agit de représenter le système technique modélisé, mais également les contraintes et les objectifs associés (cf. Figure 32).

Gaz	Chaleur	Electricité	Non spécifiée	Fixe (puissance: entrée de l'optimisation)	Variable (puissance: sortie d'optimisation)
Production	Production	Production	Production	Production	Production
Consommation	Consommation	Consommation	Consommation	Consommation	Consommation
Stockage	Stockage	Stockage	Consommation	Consommation	Consommation

Figure 31 : Représentation graphique des unités énergétiques | Source : (Pajot 2019)



Figure 32 : Modélisation des objectifs et des contraintes | Source : (Pajot 2019)

Comme représenté sur la Figure 33, les flux de puissance sont également représentés par des flèches. Des nœuds énergétiques sont représentés par des ronds. Enfin, (Pajot 2019) propose de mettre en évidence des variables d'intérêt pour les acteurs (cf. II.2.i.a).

	Gaz	Chaleur	Electricité
Flux de puissance			
Nœud énergétique			
Variable d'intérêt			

Figure 33 : Représentation associée aux flux d'énergie, nœuds énergétiques et variables d'intérêt | Source : (Pajot 2019)

La Figure 34 propose une représentation graphique d'un cas d'étude d'autoconsommation individuelle à partir du formalisme proposé par (Pajot 2019).

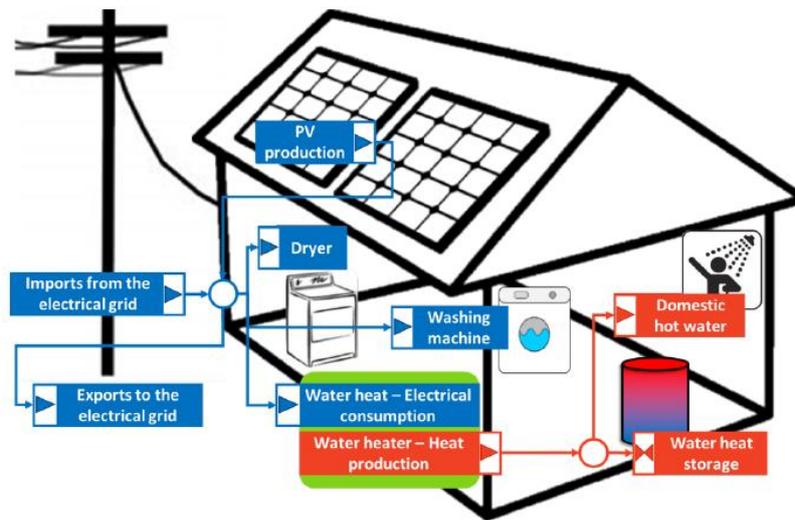


Figure 34 : Représentation graphique d'un cas d'étude d'autoconsommation individuelle | Source : (Pajot 2019)

A l'instar des deux représentations introduites précédemment, cette représentation est assez explicite pour permettre la négociation du modèle, sans pour autant représenter de manière trop réaliste le projet, coupant alors la négociation. (Terrin 2014) explique en effet que la construction d'un langage commun « nécessite des supports de représentation qui valorisent le flou et l'imprécision, pour que l'élaboration du projet soit négociation avant que d'être la description d'un objet virtuel à réaliser ».

Cette représentation est un peu plus précise sur des points qui nous semblent essentiels pour la représentation de modèles de SELBC : la représentation des types d'unités et de leurs grandes caractéristiques. De plus, une représentation des variables d'intérêt, des objectifs et des contraintes est proposée. C'est pourquoi nous choisirons cette représentation dans la suite. Dans le chapitre suivant, nous cherchons à proposer des compléments à cette modélisation (cf. III.4.i).

II.4.ii Représentation des solutions : le front de Pareto

Dans la partie précédente, nous avons mis en évidence l'importance des solutions pour la négociation. L'espace de recherche étant difficile à représenter pour de nombreuses variables, nous proposons de nous intéresser au front de Pareto. La représentation de fronts de Pareto et de solutions dominées permet visuellement de comprendre quelles sont les solutions optimales et quelles sont les autres solutions existantes (cf. Figure 26). La Figure 35 présente deux fronts de Pareto 2D et 3D issus de la thèse de (Raad 2017). Le front de Pareto lui permet d'identifier une solution, qu'il nomme solution de « bon compromis », au niveau du coude du front. Les solutions sont obtenues en faisant varier le poids des objectifs (cf. III.4.iii).

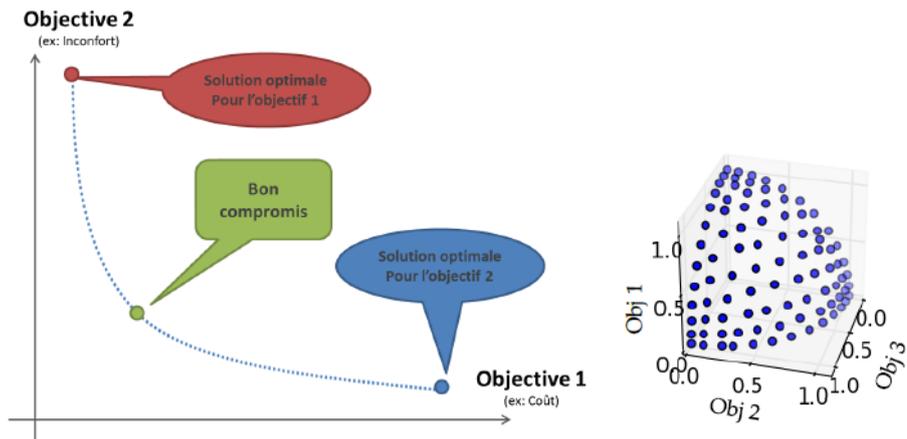


Figure 35 : Exemple de fronts de Pareto 2D (à gauche) et 3D (à droite) | Source : (Raad 2017)

(Raad 2017) présente également dans sa thèse la représentation de solutions sous la forme d'une courbe de chaleur ou « Heat-Map ». Cette technique permet de représenter en 2D les solutions d'un front de Pareto calculé sur trois variables en quantifiant l'influence d'un troisième critère par un niveau de couleur comme le montre la Figure 36.

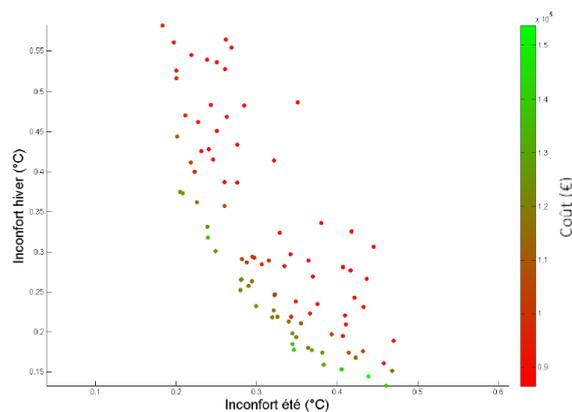


Figure 36 : Exemple de courbe de chaleur | Source : (Raad 2017)

Cependant, la présentation de ces solutions est statique. Le Pareto slider⁵⁸, présenté dans la Figure 37, vise à faire comprendre l'impact que peut avoir le choix d'une valeur pour une variable sur une autre variable, si l'on choisit de rester sur le front de Pareto. Pour des fronts de Pareto à trois objectifs, cela permet de mettre en évidence graphiquement les compromis nécessaires à faire si les valeurs des solutions optimales calculées ne conviennent pas (Alyafi Alzouhri et al. 2018).

⁵⁸ Page « Pareto slider », consultée en février 2020, <https://pareto-sliders.firebaseio.com/>.

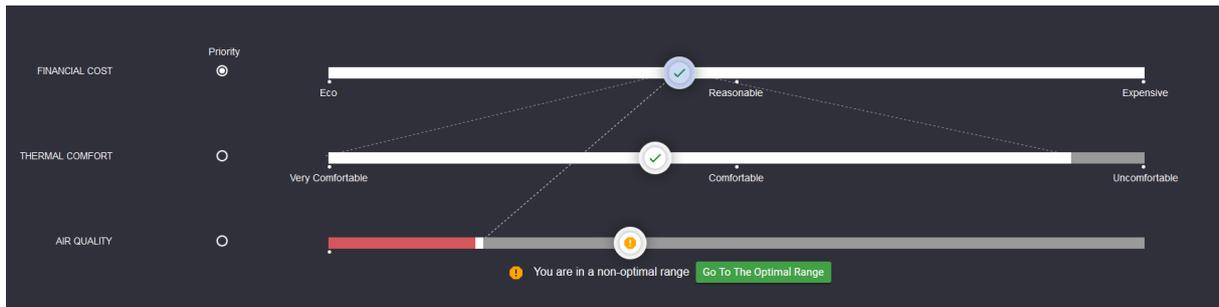


Figure 37 : Représentation graphique d'un front de Pareto à trois variables | Source : page « Pareto slider »

Pour permettre une bonne compréhension des solutions possibles de la part des parties prenantes, **il nous semble nécessaire de nous restreindre à présenter sur un même graphique des solutions portant sur deux (possiblement trois) variables uniquement. Dans le chapitre suivant, nous proposons un développement permettant la représentation automatique d'un front de Pareto en deux dimensions (cf. III.5.iii).**

II.5 Réflexions sur les conditions d'utilisation des métamodeleurs d'optimisation pour la négociation

Dans ce second chapitre, nous avons affirmé vouloir accompagner la conception des systèmes énergétiques locaux bas-carbone via des outils d'aide à la conception. Dans ce cadre, nous avons cherché à identifier un type d'outil aux fonctionnalités adaptées à une synchronisation cognitive entre les parties prenantes lors de la négociation. À ce stade, il nous paraît important de revenir sur les conditions d'utilisation de ces outils.

II.5.i Nécessité d'une négociation voulue par les acteurs

Tout d'abord, nous avons indiqué que les outils d'aide à la conception devraient devenir supports de négociation. Or, l'outil ne pourra jouer son rôle de négociation que si les parties prenantes souhaitent collaborer, ce qui n'est pas toujours le cas. En effet, sans souhait de négociation, les acteurs ne chercheront pas à discuter autour de l'outil. **C'est pourquoi une hypothèse forte de notre travail consiste à considérer que les acteurs acceptent de négocier.**

(Mermet 2019) met en évidence trois types de négociations possibles : la négociation effective, la négociation tacite, ainsi que la pseudo-négociation, présentées succinctement ci-dessous.

- La négociation effective correspond à la situation dans laquelle les parties prenantes souhaitent négocier afin de trouver une solution satisfaisante pour l'ensemble des parties prenantes sur la base de discussions explicites.
- La négociation tacite correspond à une négociation non explicitée.
- La pseudo-négociation correspond à une négociation de façade, sans volonté de trouver une solution convenant à l'ensemble des parties prenantes.

Au regard de ces différents types de négociation, notre travail vise donc à identifier comment un outil d'aide à la conception peut être **support d'une négociation effective**. Un point d'attention est qu'un outil d'aide à la conception peut tout à fait être utilisé comme support d'une pseudo-négociation par

les acteurs du projet, alors même que ce n'est pas ce que nous recherchons. En revanche, un outil d'aide à la conception nécessite des discussions explicites, c'est pourquoi il ne pourra pas être support d'une négociation tacite.

II.5.ii Un modèle commun

Au-delà de la négociation effective, notre proposition suppose un modèle commun entre les parties prenantes. Ce modèle commune n'implique pas que les parties prenantes ne peuvent pas tester par elles-mêmes plusieurs modèles, mais qu'un modèle partagé doit exister. L'hétérogénéité des besoins et des compétences des acteurs, ainsi que la possible défiance entre ces derniers, peut rendre difficile une conception commune (Ammar Khelil 2007; Darses 2009; Roth 2019). **C'est pourquoi une autre hypothèse forte de notre part consiste à considérer que les parties prenantes accepteront de travailler sur un modèle commun.**

Une autre approche que nous aurions pu proposer est la conception d'un modèle réparti entre les parties prenantes. Cependant, au vu de la complexité des projets et des modèles, de la multiplicité des acteurs et de la prise en compte d'acteurs non experts dans la conception, il nous a semblé plus pertinent de proposer un modèle unique et partagé amenant les acteurs à discuter de leurs visions différentes du même assemblage. D'autant plus que les acteurs experts continueront d'utiliser leurs propres outils. Ainsi, l'outil et les modèles tels que nous les envisageons joueraient le rôle d'objet-frontière (Star 2010), amenant les acteurs à collaborer, à se synchroniser, à négocier, puis à travailler de leur côté, et cela de manière itérative.

II.5.iii Une formulation commune

De plus, la construction du modèle possible dans le cadre des métamodeleurs identifiés, suppose une construction commune et donc une formulation commune du modèle. Nous ne l'avons pas développé dans cette thèse mais il pourrait être envisagé de proposer une formulation répartie. Celle-ci pourrait permettre aux acteurs de ne pas diffuser leurs données, leurs objectifs et leurs contraintes, qu'ils peuvent considérer comme des données confidentielles, et ainsi les amener à coopérer plus facilement. Dans sa thèse, (Ammar Khelil 2007) s'intéresse à la conception collaborative à distance et propose un environnement d'aide au dimensionnement collaboratif adapté à la conception en génie électrique. Elle propose une architecture permettant une formulation répartie du modèle menant tout de même au final à un modèle commun qu'elle appelle « modèle global ».

II.5.iv Une asymétrie de savoir et de savoir-faire entre les parties prenantes

Par ailleurs, jusqu'ici nous avons considéré que l'utilisation était fondée sur une symétrie de savoir entre les parties prenantes. En effet, nous avons indiqué que cet outil était destiné à être utilisé par l'ensemble des parties prenantes. C'est pourquoi nous nous sommes orientée vers un métamodeleur d'optimisation basé sur de la programmation orientée objet. Cependant, **il faut reconnaître que l'ensemble des acteurs n'ont pas les mêmes capacités de prise en main de l'outil.** En effet, certains acteurs néophytes pourront rencontrer plus de difficultés à installer les bibliothèques et à modéliser un problème. De même, tous les acteurs n'ont pas la même connaissance des assemblages socio-énergétiques.

Cherchant à pallier les difficultés de prise en main de l'outil, une interface graphique a été développée comme nous le présentons dans le chapitre suivante (cf. III.4.ii)⁵⁹. Même si une interface graphique permet de proposer une modélisation plus facile, elle ne comble pas l'ensemble de l'asymétrie de savoir-faire des acteurs. En effet, seul l'accès à la bibliothèque de modèles via le code permet d'ajouter des briques de modèles répondant aux besoins des acteurs. L'interface graphique ne permet pas de nouveaux développements. L'utilisation de l'outil reste donc limitée pour les non-experts.

Bien que nous favorisions une conception multipartie prenante, une utilisation très probable de l'outil serait un développement du modèle par un acteur de type bureau d'étude et une discussion entre les acteurs des points nécessitant une négociation, même si, techniquement, l'outil permet à chacun de modéliser son problème et de l'optimiser.

II.5.v Un modèle partiel

Comme tout outil, le métamodeleur d'optimisation ne permet pas de modéliser toutes les composantes du problème, notamment parce qu'il n'est pas techniquement possible de le faire. Il ne nous semble pas non plus nécessaire de chercher à tout modéliser. (Box 1976) explique que puisque tous les modèles sont faux, le scientifique ne peut pas obtenir un modèle « correct », même avec une modélisation excessivement détaillée⁶⁰. Notre vision s'inscrit dans une démarche épistémologique constructiviste d'un modèle, dont le critère doit être, non pas l'exhaustivité, mais l'effectivité (ou l'utilité et la pertinence). **Notre objectif est de proposer une bibliothèque de modèles qui permet d'accompagner les acteurs à construire ensemble, bien qu'elle puisse être incomplète.** Les solutions identifiées ne sont donc pas « la » ou « les » solution(s) du problème, puisque le problème n'est pas entièrement modélisé, mais des solutions possibles au vu du modèle proposé.

De plus, étant en phase de pré-étude, les incertitudes sont encore importantes. Chercher à tout modéliser de manière fine, peut amener à produire un modèle plus faux qu'il ne le serait avec une modélisation macroscopique. Par ailleurs, il peut être intéressant de garder des zones d'ombre, pour permettre l'avancement du projet. En effet, (Boutinet 2015) explique que si les acteurs cherchent à définir de manière trop précise le projet, il y a une perte d'adhésion de certains acteurs. Il faut considérer que toute modélisation reste intrinsèquement une idéalisation et une simplification du phénomène ou de l'objet considéré. La modélisation est donc et restera donc incomplète.

⁵⁹ Nous avons également développé deux documentations : une pour l'outil (<https://omegalpes.readthedocs.io/en/latest/>) et une pour les exemples (<https://omegalpes-examples.readthedocs.io/en/latest/>).

⁶⁰ En anglais : “Since all models are wrong the scientist cannot obtain a "correct" one by excessive elaboration”.

II.5.vi Modélisation subjective : une interprétation portée par les acteurs et non les outils

Toute modélisation comporte une part de subjectivité, même dans le cas où le modélisateur cherche à la minimiser. Cette subjectivité peut être liée aux biais de pensée des modélisateurs de la bibliothèque de modèles ou du modélisateur du modèle associé au SELBC. La subjectivité peut également venir des possibilités techniques de modélisation de l'outil, qui orientent les choix de modélisation. La modélisation et l'optimisation nécessitent donc que l'utilisateur adopte une position critique vis-à-vis des solutions obtenues grâce à l'optimisation.

II.5.vii Discuter de solutions non « optimales » : le front de Pareto comme référence

Les solutions optimales identifiées par les outils ne sont pas toujours les solutions retenues, ni les solutions à retenir. Ainsi, (Banos 2016) nous invite à « cesser de proposer des solutions uniques et optimales à des problèmes complexes ». Il explique en effet que « les modèles de systèmes complexes se caractérisent pas l'existence de solutions multiples, dont aucune n'est en général meilleure que les autres, si on s'en tient aux seuls principes ayant présidé à la construction du modèle ». Cette affirmation peut être confirmée par la thèse de (Recht 2016), comme le montre la Figure 38. En effet, bien qu'un front de Pareto puisse être identifié, le constructeur s'est orienté vers une solution qui, dans ce cas, n'appartient même pas à l'espace de faisabilité, mais tout de même à l'espace de recherche. Pour cela, certaines contraintes, probablement « négociables », ont dû être relevées.

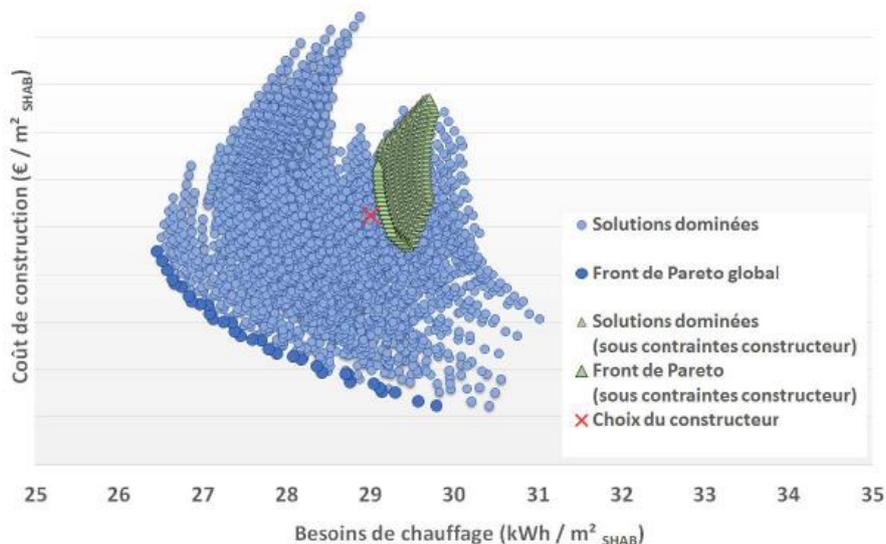


Figure 38 : Ensemble des solutions étudiées sans intégration des contraintes du constructeur (en bleu) et avec (en vert) | Source : (Recht 2016)

Pour nous, cette situation exprime que le problème à la base était sur-contraint. Il peut donc être intéressant :

- d'amener les acteurs à modérer leurs contraintes, et
- de présenter aux parties prenantes des solutions ne respectant pas l'ensemble des contraintes ou des solutions dominées car ces solutions peuvent être également choisies par les parties prenantes.

De plus, cela exprime également qu'il manquerait (*a minima* sur ce graphique) d'autres critères permettant d'expliquer le choix du constructeur. (Banos 2016) explique que « d'autres critères, externes, doivent souvent être mobilisés ». Cependant, si cette optimisation lui a permis de faire son choix, nous considérons que la modélisation est suffisante, bien qu'elle ne représente pas tous les critères.

Nous considérons qu'un métamodeleur doit être utilisé pour tester des solutions et pour identifier (ou exclure) des solutions plutôt que pour chercher à identifier « la » solution d'un problème. En outre, dans le cadre d'un projet multiacteur, il est nécessaire de montrer que l'on pourra trouver un espace de solutions dans lequel chacun des acteurs aura la conviction qu'il pourra ensuite trouver une solution en cohérence avec ses contraintes et ses objectifs.

Conclusion du chapitre II

Ce second chapitre nous a permis d'identifier comment les outils d'aide à la conception, est plus précisément les métamodeleurs, pouvaient devenir des supports de négociation. Nous avons tout d'abord mis en évidence l'intérêt d'avoir recours à un métamodeleur (i.e. proposant des briques de modèles) d'optimisation linéaire mixte (MILP) open source basé sur un langage orienté objet, avec une interface graphique et des notebooks associés. Nous avons alors réalisé une cartographie d'outils correspondant à ces critères. Nous avons identifié trois outils y répondant : Calliope, oemof et OMEGAAlpes. Nous nous sommes ensuite intéressée aux entrées d'un modèle d'optimisation MILP pour définir comment elles pouvaient accompagner les négociations. Il s'agit des variables, des données, des contraintes et des objectifs, qui influencent la ou les solution(s) identifiée(s) par l'outil. Nous avons mis en évidence que les contraintes jouaient un rôle très important et avaient besoin de pouvoir être négociées, car le problème peut être sans solution si les contraintes imposées par les acteurs sont incompatibles. Nous avons donc mis en exergue qu'il était intéressant d'identifier les contraintes incompatibles et leur degré de négociation, dans l'idée de les présenter aux parties prenantes. L'enjeu étant de s'assurer de pouvoir identifier au moins une solution en faisant relâcher une partie des contraintes. Ensuite, nous avons rappelé la possibilité de discuter des solutions grâce au calcul du front de Pareto et à la comparaison de fronts de Pareto. Enfin, nous avons rappelé l'importance de la représentation pour la synchronisation cognitive, que ce soit celle du modèle ou des solutions. Nous avons mis en évidence plusieurs représentations de modèle en retenant celle proposée par (Pajot 2019). Pour les solutions, les fronts de Pareto à deux variables nous semblent les plus compréhensibles. Enfin, il nous semblait essentiel de nous interroger sur les conditions d'utilisation de l'outil et les hypothèses sous-entendues de notre travail. Nous avons notamment mis en évidence la nécessité d'une négociation voulue par les acteurs, la nécessité d'un modèle commun et d'une formulation commune, ainsi que le fait que la modélisation est partielle et subjective. Enfin, nous avons mis en évidence que ce n'est pas parce que l'outil identifie des solutions optimales, vis-à-vis du problème modélisé, que les acteurs sont amenés à les choisir.

Le chapitre suivant propose des « briques » de code auxquelles nous avons contribuées pour répondre à plusieurs besoins identifiés pour les métamodeleurs dans ce chapitre.

CHAPITRE III

Propositions de briques complémentaires
pour accompagner la négociation : application
sur le métamodeleur OMEGAlpes

III.1	PRESENTATION DU METAMODELEUR OMEGALPES	96
III.1.i	<i>Bibliothèque de modèles</i>	96
III.1.ii	<i>Modeleur PuLP et solveur CBC</i>	98
III.2	LES VARIABLES DISCRETES OU LE DIMENSIONNEMENT « IMAGINAIRE » POUR FACILITER LA RESOLUTION	99
III.3	LES CONTRAINTES INCOMPATIBLES ET LEUR IDENTIFICATION SELON LEUR DEGRE DE NEGOCIATION.....	100
III.3.i	<i>Modèle des différentes typologies de contraintes dans l'outil</i>	100
III.3.ii	<i>Algorithmes d'identification de contraintes incompatibles : LPFICS</i>	102
III.3.iii	<i>LPFICS et les différentes typologies de variables</i>	104
III.3.iv	<i>Pistes d'amélioration pour l'identification des contraintes selon les typologies</i>	105
III.4	LE DEVELOPPEMENT D'UNE INTERFACE GRAPHIQUE	105
III.4.i	<i>Propositions de modifications pour la représentation graphique proposée par Pajot</i>	105
III.4.ii	<i>Interface graphique OMEGAlpes-Web basée sur cette représentation graphique</i>	107
III.4.iii	<i>Limites et perspectives pour l'interface graphique</i>	108
III.5	LE CALCUL ET LA REPRESENTATION DES FRONTS DE PARETO	108
III.5.i	<i>Méthode « ϵ-contrainte » – mal adaptée aux méthodes MILP</i>	109
III.5.ii	<i>Méthode de pondération pour un ensemble de solutions – adaptée aux méthodes MILP</i>	109
III.5.iii	<i>Tracer un front de Pareto pour deux objectifs</i>	110
III.5.iv	<i>Tracer d'autres fronts de Pareto</i>	111
	CONCLUSION DU CHAPITRE III	111

Chapitre III. Propositions de briques complémentaires pour accompagner la négociation : application sur le métamodeleur OMEGAlpes

Le chapitre précédent a mis en évidence des besoins pour accompagner la négociation des parties prenantes à partir d'outils d'aide à la conception. Ce chapitre vise à présenter des « briques » de code auxquelles nous avons contribué pour répondre à ces besoins (cf. Figure 39). Suite à la cartographie de métamodeleurs adaptés à la conception de SELBC (cf. II.1.v), nous avons choisi de travailler avec OMEGAlpes. Les briques présentées dans cette partie ont donc été développées en open source et testées sur ce métamodeleur⁶¹. Une première partie présente plus en détail le métamodeleur OMEGAlpes (III.1).

La suite de ce chapitre présente les briques. Ainsi, dans une seconde partie, nous présentons un nouveau type d'unités énergétiques : les unités « imaginaires » basées sur le concept développé par (F. Wurtz, Kuo-Peng, et Carvalho 2012) (III.2). Ce développement fait suite à l'augmentation des temps de résolution si le modèle se base sur des variables discrètes (cf. II.2.i.a). Ensuite, nous présentons une méthode d'identification de contraintes incompatibles. En effet, nous avons mis en exergue, dans le chapitre précédent (cf. II.2.iii), l'importance d'identifier les contraintes incompatibles dans le cadre de problèmes sur-contraints pour permettre aux acteurs de les négocier. Cette méthode est développée au sein du projet LPFICS (Find Incompatible Constraint Sets in Linear Problems) (III.3). L'intérêt était également de pouvoir les différencier selon leur degré de négociation (contraintes de définition non négociables, contraintes techniques peu négociables, contraintes d'acteurs plutôt négociables). Par ailleurs, dans le chapitre précédent, nous avons également insisté sur l'importance de la représentation pour la synchronisation cognitive. C'est pourquoi, nous proposons une interface graphique, basée sur la représentation graphique proposée par (Pajot 2019, 31-33), développée par des étudiants en master (III.3.iv). Cette interface permet d'accompagner la conception des modèles des systèmes énergétiques pour le métamodeleur OMEGAlpes. Enfin, nous présentons une méthode de calcul et de représentation de fronts de Pareto que nous avons développée dans le métamodeleur (III.4.iii).

⁶¹ Le code est disponible ici : <https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes>.

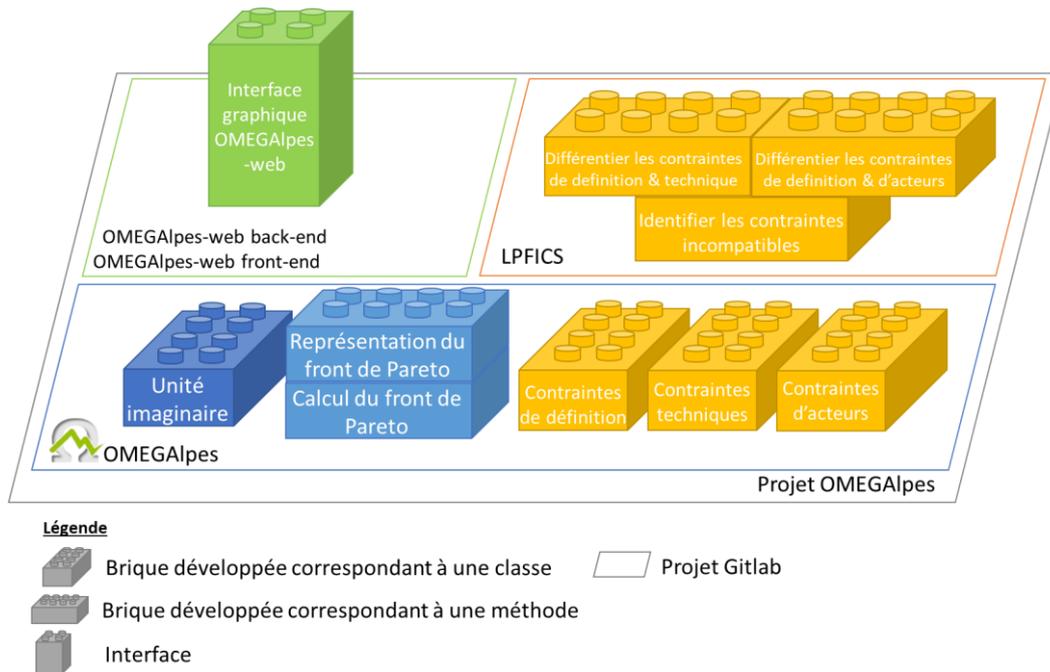


Figure 39 : Briques développées pour accompagner la négociation des parties prenantes | Source : Auteure

III.1 Présentation du métamodèleur OMEGAlpes

Cette première partie présente dans les grandes lignes le métamodèleur OMEGAlpes. Nous introduisons tout d'abord la bibliothèque de modèles, pièce essentielle des métamodèleurs. Nous présentons ensuite des briques embarquées par OMEGAlpes pour la résolution des problèmes : le modèleur PuLP et le solveur CBC.

III.1.i Bibliothèque de modèles

Le métamodèleur OMEGAlpes (Generation of Optimization Models As Linear Programming for Energy Systems) est présenté dans l'article coécrit (Pajot et al. 2019) et plus en détail dans la thèse de (Pajot 2019). Comme indiqué dans le chapitre précédent, l'outil propose une bibliothèque de modèles pour l'optimisation basée sur le langage orienté objet Python.

La bibliothèque de modèles est composée d'une unité énergétique de base (*EnergyUnit*) et de cinq principaux types d'unités énergétiques qui en découlent :

- unité de production (*ProductionUnit*) comme par exemple une éolienne,
- unité de consommation (*ConsumptionUnit*) comme par exemple un appareil électroménager ou un logement,
- unité de conversion d'un vecteur énergétique à un autre (*ConversionEnergyUnit*) comme par exemple une pompe à chaleur,
- unité de stockage (*StorageUnit*) pour la modélisation de batteries ou d'un ballon d'eau chaude par exemple,
- unité réversible (*ReversibleUnit*), ajoutée a posteriori de la thèse de (Pajot 2019), pour modéliser les systèmes énergétiques qui peuvent produire et consommer, mais pas simultanément, comme par exemple le réseau électrique.

La bibliothèque de modèles propose également des unités énergétiques avec des caractéristiques spécifiques : les unités énergétiques dont le fonctionnement est fixé par des données d'entrée (*FixedEnergyUnit*), celles dont le fonctionnement est variable (*VariableEnergyUnit*), celles dont la courbe de fonctionnement est fixe mais déplaçable au cours de la période étudiée (*ShiftableEnergyUnit*), celles dont le fonctionnement suit une forme rectangulaire (*SquareEnergyUnit*), etc. Ces développements sont ajoutés, lorsque cela est possible, aux différents types d'unités de base cités précédemment. Le diagramme des classes dédié aux unités énergétiques, présenté dans la Figure 40, regroupe les différentes unités énergétiques selon leur type. Cette représentation n'est pas exhaustive pour des raisons de facilité de lecture.

Les unités énergétiques ont des paramètres d'entrée qui peuvent être complétés par le modélisateur, certains l'étant par défaut. Pour l'unité de production, il s'agit par exemple d'un nom (*name*), du type de vecteur énergétique (*energy_type*), d'une puissance maximale (*p_max*), minimale (*p_min*), etc. Des objectifs et des contraintes sont également prédéfinies. Par exemple, pour l'unité de production, il existe l'objectif de maximiser la production (*maximize_production*) ainsi que la contrainte d'une énergie maximale pour la période du cas d'étude (cette contrainte est automatiquement créée si le paramètre *p_max* est rempli lors de la définition de l'unité énergétique). Les unités énergétiques doivent ensuite être reliées à des nœuds énergétiques (*EnergyNode*) assurant l'équilibre des échanges énergétiques à chaque pas de temps dans le système. L'Encadré 15 présente un exemple de système énergétique modélisable à partir de la bibliothèque OMEGAlpes.

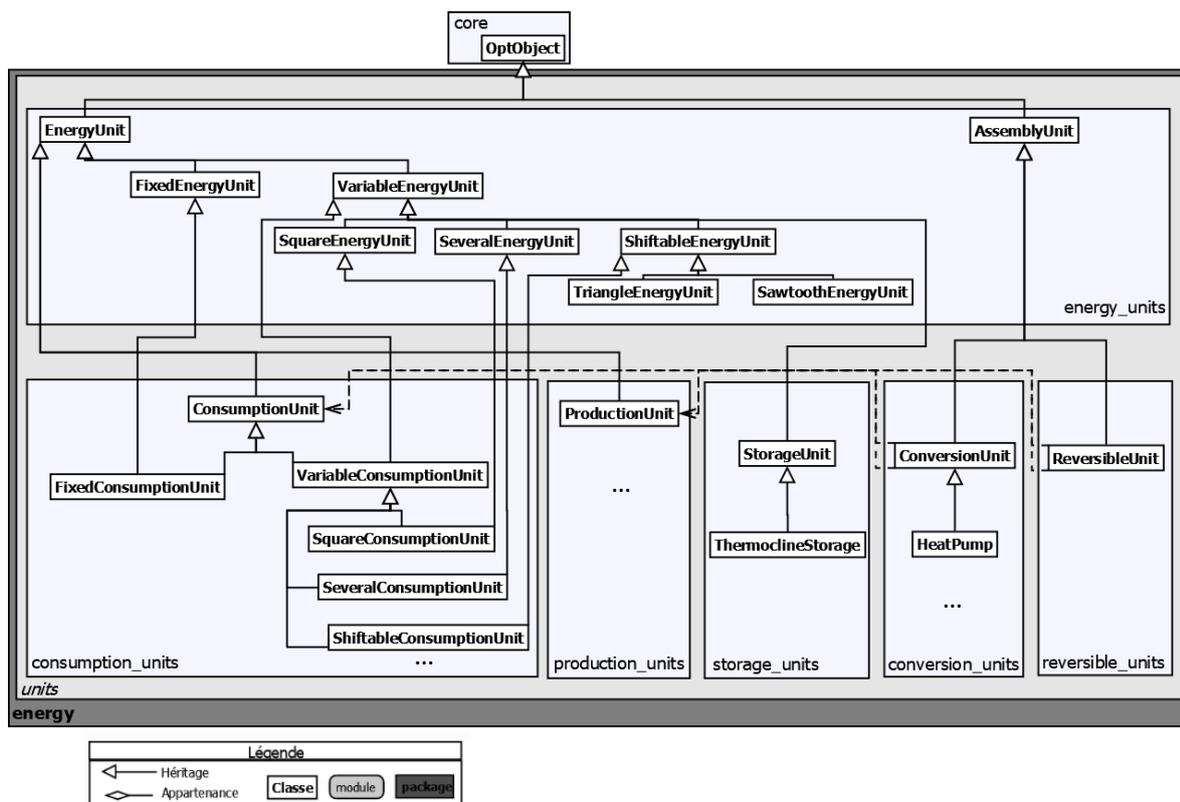


Figure 40 : Diagramme des classes pour les unités énergétiques d'OMEGAAlpes | Source : Auteure à partir de (Pajot et al. 2019)

Encadré 15 : Exemple d'un système énergétique simple modélisable avec OMEGAlpes

La bibliothèque OMEGAlpes permet de modéliser de nombreux systèmes énergétiques. Voici un exemple (cf. Figure 41) : il s'agit de deux centrales de production de chaleur variable (*VariableProduction* A et B) et de deux unités de consommation de chaleur fixe (*FixedConsumption* 1 et 2) reliées entre-elles par un réseau composé d'un nœud énergétique (*EnergyNode*). Ce dernier assure l'équilibre à chaque instant des échanges de chaleur. Les centrales de production sont définies par les données d'entrée suivantes : le nom (*name*), le vecteur énergétique chaleur (*EnergyType*), la puissance de fonctionnement maximale (*p_max*) ajoutée comme une contrainte, l'objectif (*maximize_production* traduit par maximiser la production), etc.

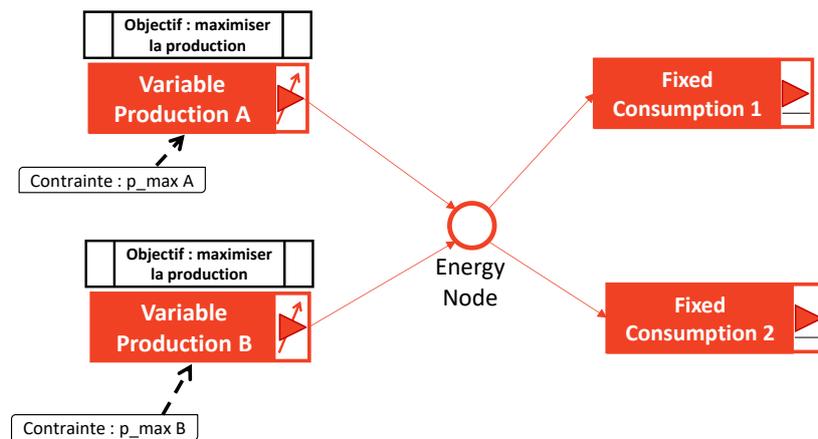


Figure 41 : Représentation d'un système énergétique modélisable à partir de la bibliothèque OMEGAlpes | Source : Auteure

III.1.ii Modeleur PuLP et solveur CBC

La bibliothèque de modèles n'est en fait qu'une surcouche pour accompagner la modélisation mais ne permet pas de résoudre, i.e. d'optimiser, le problème. Pour cela, il est tout d'abord nécessaire de traduire le modèle en un langage compréhensible par le solveur, puis ensuite de faire tourner le solveur, comme représenté sur la Figure 42.

Pour passer du modèle orienté objet (langage de haut niveau et compréhensible) au langage adapté au solveur (langage de bas niveau), OMEGAlpes se base sur le modeleur et projeteur PuLP⁶² développé en Python. Le modeleur Pyomo aurait également pu être utilisé (Hart, Watson, et Woodruff 2011). L'intérêt du modeleur PuLP est qu'il intègre le solveur CBC, facilitant la prise en main de l'outil pour les

⁶² Mitchell J. S. et S. A. Roy, 2020, PuLP 2.2, Logiciel, Python, In *Github*, 23 novembre 2019, consulté le 6 mars 2020, <https://github.com/coin-or/pulp>.

non-experts. Il n'est en effet pas nécessaire d'installer de solveur en plus du modelleur, le téléchargement du solveur se fait automatiquement lors de l'installation du modelleur.

Le solveur permet de résoudre le problème. Là encore, d'autres solveurs open sources pourraient être utilisés comme GLPK⁶³ ou LpSolve⁶⁴. En effet, PuLP fait aussi le lien avec d'autres solveurs grâce à la création d'un fichier (.lp ou autre selon les besoins du solveurs). Ce fichier, contenant le problème décrit en langage de bas niveau, peut donc être utilisé par un solveur, sans nécessiter de lien direct entre le modelleur et le solveur. Cependant, cette démarche peut être plus compliquée pour des non-experts.

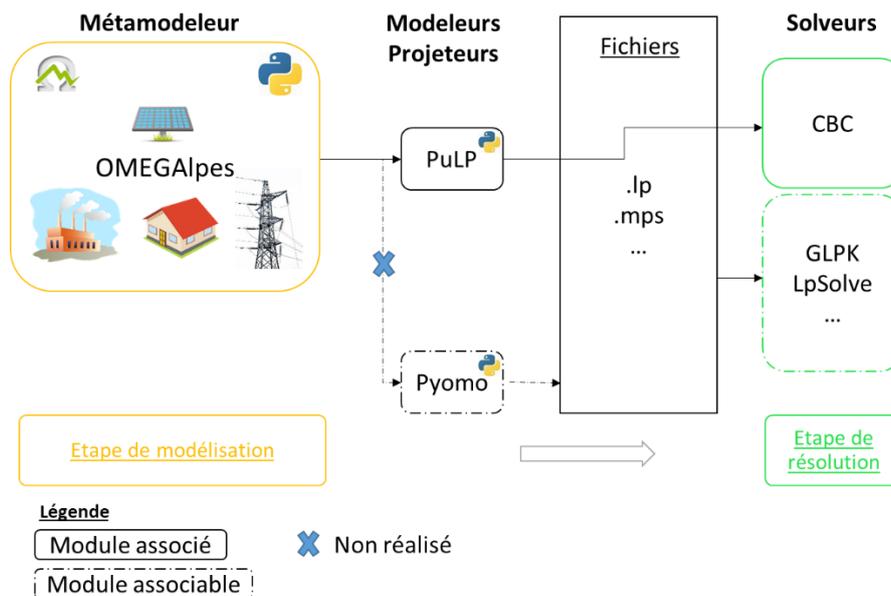


Figure 42 : Du métamodelleur OMEGAlpes au solveur | Source : Auteure

Les développements réalisés et présentés dans ce chapitre ont donc été développés sur la base du métamodelleur OMEGAlpes, qui intègre le projeteur PuLP et le solveur CBC.

III.2 Les variables discrètes ou le dimensionnement « imaginaire » pour faciliter la résolution

Le premier développement que nous présentons fait suite à l'augmentation du temps de résolution dans le cas où le modèle se base sur des variables discrètes. C'est par exemple le cas lorsque l'on souhaite modéliser un système de production photovoltaïque basé sur plusieurs panneaux photovoltaïques. Pour modéliser des panneaux photovoltaïques sous forme de modules identiques

⁶³ Free Software Foundation, 2012, GLPK, Logiciel, In *GLPK (GNU Linear Programming Kit)*, 23 juin 2012, consulté le 6 mars 2020, <https://www.gnu.org/software/glpk/>.

⁶⁴ Notebeart Peter et Kjell Eikland, 2020, Lpsolve 5.5.2.9, Logiciel, In *SourceForge*, 13 mars 2020, consulté le 15 novembre 2020, <https://sourceforge.net/projects/lpsolve/>.

nous avons développé l'unité énergétique *SeveralProductionUnit*⁶⁵. L'unité *SeveralProductionUnit* est basée sur une courbe de production donnée *fixed_power* à rentrer comme paramètre. Pour une production photovoltaïque, le paramètre *fixed_power* correspond à la courbe de production basée sur l'ensoleillement. Cette production peut être multipliée plusieurs fois. Le nombre de fois à déterminer correspond à la variable *nb_unit* qui est une variable discrète dont les valeurs doivent être entières⁶⁶. Pour une production photovoltaïque, la variable *nb_unit* correspond au nombre de modules photovoltaïques qui doit effectivement être un nombre entier.

Dans le chapitre II, nous avons mis en évidence une augmentation du temps résolution suite à l'introduction de variables discrètes (cf. II.2.i.a). A l'instar du concept développé par (F. Wurtz, Kuo-Peng, et Carvalho 2012), nous proposons donc que l'unité *SeveralEnergyUnit* puisse être « imaginaire ». **Pour cela le paramètre booléen *imaginary* a été ajouté dans l'unité.**

- si *imaginary=False* (par défaut), la variable *nb_unit* est discrète, il s'agit uniquement de nombres entiers,
- si *imaginary=True*, la variable *nb_unit* devient continue. Les parties prenantes sont alors amenées à choisir *a posteriori* de l'optimisation une valeur correspondant à une solution « existante ».

Nous présentons dans le chapitre VI la différence en temps de résolution et valeurs obtenues sur un cas d'étude (cf. VI.4.ii).

III.3 Les contraintes incompatibles et leur identification selon leur degré de négociation

Cette partie présente deux autres évolutions développées pour accompagner la négociation dans les métamodeleurs vis-à-vis des contraintes. Suite aux préconisations faites dans le chapitre précédent (cf. II.2.iii), nous avons choisi de travailler sur la distinction entre plusieurs types de contraintes (cf. III.3.i) et sur l'identification de contraintes incompatibles dans le cadre d'un problème infaisable (III.3.ii). Nous avons rassemblé ces deux approches pour pouvoir identifier les contraintes selon leur degré de négociation (III.3.iii).

III.3.i Modèle des différentes typologies de contraintes dans l'outil

Toutes les contraintes ne sont pas destinées à être négociées. Dans le chapitre précédent, nous avons mis en évidence la typologie suivante, associée au degré de négociation des contraintes (cf. II.2.i.a). Nous avons identifié :

⁶⁵ L'unité *SeveralProductionUnit* hérite de, i.e. est basée sur, l'unité *SeveralEnergyUnit*. Le code est disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/energy/units/energy_units.py.

⁶⁶ La quantité *nb_unit* est pour cela de type *LpContinuous*.

- les contraintes de définition et physiques, que nous appelons contraintes de définition et que nous considérons comme non négociables,
- les contraintes techniques, qui sont *a priori* peu négociables, à moins de changer de système technique, et
- les contraintes liées aux parties prenantes, que nous appelons contraintes d'acteurs, qui sont *a priori* négociables, car décidées par ces dernières.

La différenciation des contraintes au sein de l'outil OMEGAlpes a été réalisée en créant trois classes de contraintes héritant de la classe principale *Constraint*. Ainsi, nous avons développé :

- La classe **DefinitionConstraint** pour les contraintes de définition. Un exemple de ce type de contrainte est la contrainte *calc_e_tot*⁶⁷, qui définit l'énergie comme le produit entre la somme des puissances p à chaque pas de temps et le pas de temps (cf. II.2.iii.a équation (2)).
- La classe **TechnicalConstraint** pour les contraintes techniques. Un exemple de ce type de contrainte est de limiter l'allumage d'une unité énergétique selon une rampe d'allumage, comme le fait la contrainte *set_max_ramp_up*⁶⁸ (cf. II.2.iii.a équation (3)). Cette contrainte s'ajoute automatiquement au problème si le paramètre *max_ramp_up* est complété avec une valeur (celle correspondant à la pente).
- La classe **ActorConstraint** pour les contraintes d'acteurs. Un exemple de ce type de contrainte est le fait de restreindre à certaines plages horaires l'utilisation de certains appareils domestiques, comme le permet la contrainte *daily_dynamic_constraint*⁶⁹ (cf. II.2.iii.a équation (4)).

Les autres contraintes développées dans l'outil héritent donc d'une de ces trois classes en fonction du type de contraintes. Les contraintes étant déjà divisées en deux types à la base : *Constraint*, pour les contraintes indépendantes du temps, et *DynamicConstraint*, pour les contraintes évoluant au cours de l'étude, les trois nouvelles classes sont donc également divisées en deux types de classes à chaque fois, comme présenté sur la Figure 43.

⁶⁷ Le code est disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/energy/units/energy_units.py.

⁶⁸ Le code est disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/energy/units/energy_units.py.

⁶⁹ Le code est disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/actor/operator_actors/producer_actors.py.

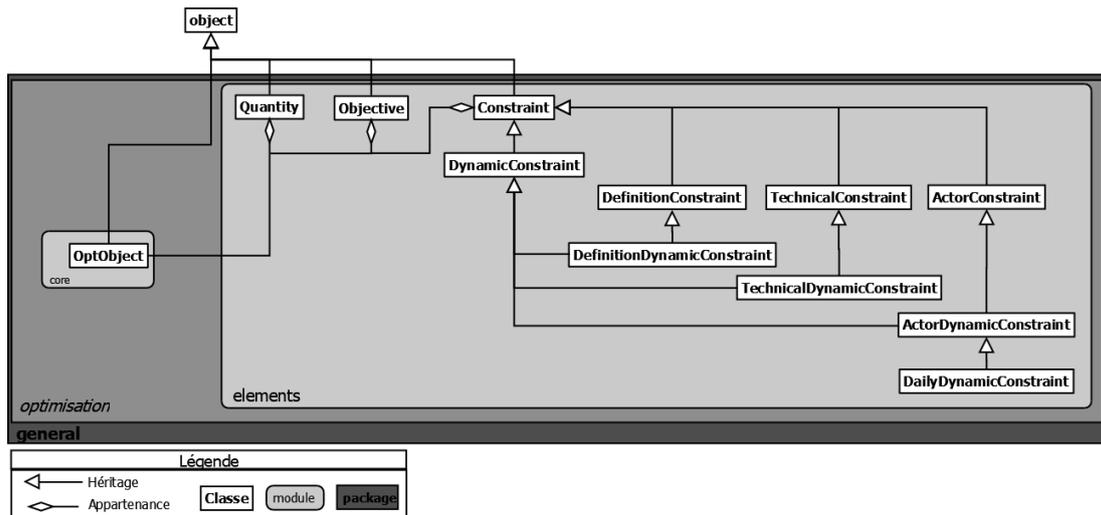


Figure 43 : Création de trois types de contraintes : *DefinitionConstraint*, *TechnicalConstraint* et *ActorConstraints* et héritage | Source : Auteure

III.3.ii Algorithmes d'identification de contraintes incompatibles : LPFICS

Nous avons également mis en évidence la nécessité d'identifier les contraintes incompatibles dans le cas de problèmes sur constraints (cf. II.2.iii.b). Cette partie présente deux méthodes, identifiées dans la littérature, permettant d'identifier des contraintes incompatibles. Nous avons redéveloppé la seconde afin qu'elle soit utilisable avec OMEGAlpes.

La première méthode que nous évoquons a été développée pour les solveurs conservant les (pré-)valeurs des variables, même dans le cas où le modèle est sans solution. C'est pourquoi nous parlons de pré-valeur, et non de valeur optimisée. Dans le cas d'un problème sur-contraint, il existe au moins une variable dont la valeur ne peut pas respecter l'ensemble des contraintes liées à cette variable. Les contraintes incompatibles sont donc identifiées lorsqu'un (ou plusieurs) paramètre(s) ne respecte(nt) pas ces contraintes. En revanche, cette méthode ne peut pas s'appliquer à tous les solveurs, car ils ne conservent pas tous des pré-valeurs pour les variables. En effet, ce n'est pas le cas du solveur CBC, solveur privilégié d'OMEGAlpes, car intégré à PuLP (cf. III.1.ii).

La seconde méthode consiste à trouver le plus petit sous-système ayant des contraintes contradictoires. Le système de contraintes ainsi identifié doit respecter les conditions suivantes : le sous-système obtenu est un ensemble de contraintes tel que :

1. le problème initial est un système infaisable, et
2. si l'on retire une des contraintes de ce sous-système, il devient faisable (Gurobi Optimization, Inc. 2017, 485-459).

On parle de sous-système IIS, IIS signifiant « Irreducible Inconsistent Subsystem ». Le solveur Gurobi propose la méthode *Model.computeIIS* basée sur ce principe (Gurobi Optimization, Inc. 2017, 485-459). Cependant, du fait du caractère propriétaire de l'outil, cette méthode n'est pas disponible en open source et ne peut donc pas être réutilisée.

Un algorithme basé sur cette méthode a par ailleurs été présenté théoriquement sous le nom de QuickXplain par Junker (Junker 2004) et Rodler (Rodler 2001). Elle a été développée dans le langage Ruby par Guillaume Verger⁷⁰ sous licence MIT sous le nom de Ruby-CBC. Cependant, Ruby-CBC n'est pas compatible avec OMEGAlpes. En effet, Ruby-CBC est un modèleur intégrant le solveur CBC. La résolution se fait donc en interne de l'outil. Pour rendre OMEGAlpes et Ruby-CBC compatibles, il aurait alors fallu traduire notre modèle développé en Python en Ruby. Nous avons préféré traduire l'algorithme d'identification de contraintes en langage Python reprenant la licence MIT (cf. Figure 44). Nous avons appelé la méthode *find_incompatible_constraint_set* qui vise à identifier un groupe de contraintes incompatibles. Cette méthode est développée au sein du projet LPFICS⁷¹ pour : Linear Problems : Find Incompatible Constraint Sets, i.e. identifier le groupe de contraintes incompatibles pour les problèmes linéaires.

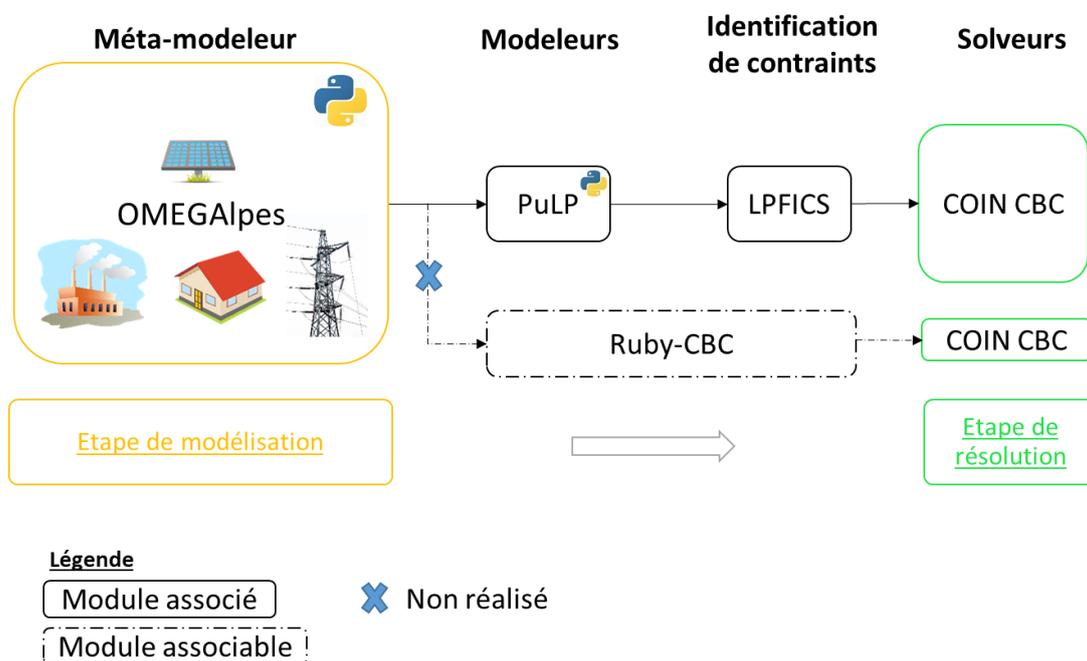


Figure 44 : Insertion possible des méthodes LPFICS et Ruby-CBC vis-à-vis d'OMEGAlpes | Source : Auteur

Les grandes étapes⁷² de la méthode *find_incompatible_constraint_set*, codées dans LPFICS, sont les suivantes (cf. Figure 45) :

- 1) Diviser les contraintes du modèle en deux groupes égaux (possiblement à une contrainte près)

⁷⁰ Verger, Guillaume, 2016, Ruby-Cbc, Logiciel, Ruby, In *Github*, consulté le 15 novembre 2020, <https://github.com/gverger/ruby-cbc>.

⁷¹ Le code est disponible ici : <https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/lpfics>.

⁷² Nous ne présentons ici que les grandes étapes, et non le code en détails, au sein duquel la gestion des groupes de contraintes est plus complexe.

- 2) Optimiser le modèle avec le premier groupe ; s'il existe une solution avec le premier groupe, optimiser le deuxième groupe.
 - a) Si un des deux sous-groupes n'a pas de solution recommencer à partir de l'étape 1 avec ce sous-groupe jusqu'à trouver un problème insolvable à deux contraintes.
 - b) Si les deux sous-groupes ont tous les deux une solution, changer l'ordre des contraintes du groupe précédent et recommencer à l'étape 1
 - c) Si aucun sous-groupe à deux contraintes n'a pu être identifié, récupérer le groupe précédent et recommencer à l'étape 1 en cherchant un groupe de contraintes à une contrainte de plus, jusqu'à identifier le plus petit sous-groupe.

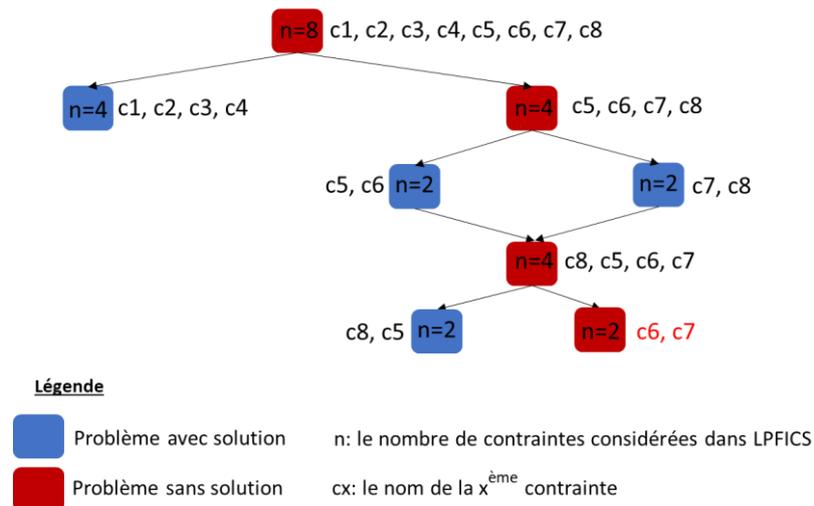


Figure 45 : Représentation graphique du fonctionnement global de la méthode *find_incompatible_constraint_set* | Source : Auteure à partir de (Junker 2004)

Il est à noter que, comme pour la méthode proposée dans Gurobi, le modèle initial peut avoir plusieurs sous-systèmes de type IIS mais seul un IIS est identifié. Il est donc possible qu'une fois les contraintes identifiées relevées, le modèle reste sur-contraint. Il faut alors réitérer le processus.

L'Annexe B présente une comparaison des deux algorithmes d'identification : ComputeISS de Gurobi et LPFICS sur un exemple d'application. Elle montre une validation du fonctionnement de la méthode *find_incompatible_constraint_set*, mais des performances moindres par rapport à Gurobi. Au-delà de la performance de l'algorithme, la moins bonne performance s'explique en partie par le fait que le solveur Gurobi est plus rapide que le solveur CBC. Par ailleurs, nous avons pu remarquer, sur certains cas d'étude, que LPFICS identifie un sous-groupe cohérent sans que ce soit le plus petit sous-groupe possible.

III.3.iii LPFICS et les différentes typologies de variables

Dans son article, (Junker 2004) propose également de travailler avec une hiérarchisation des contraintes. L'ajout de différentes typologies de contraintes dans l'outil peut être utilisé de deux manières. La première est une utilisation *a posteriori* de la méthode *find_incompatible_constraint_set*. Une fois l'IIS identifié, il est possible de connaître immédiatement le niveau de négociation pour ces contraintes. En effet, lorsque la méthode identifie les contraintes, le type des contraintes identifiées est indiqué. Ainsi une fois l'IIS identifié les informations suivantes sont données :

- le type de contrainte (*DefinitionConstraint*, *DefinitionDynamicConstraint*, *TechnicalConstraint*, *TechnicalDynamicConstraint*, *ActorConstraint*, *ActorDynamicConstraint*, ou encore *Constraint*, *DynamicConstraint*),
- le nom de la contrainte, et
- le calcul de la contrainte.

L'autre approche est d'identifier les contraintes en fonction de leur typologie. Pour cela, nous avons défini deux autres méthodes permettant de séparer les contraintes en sous-groupes, selon les types de contraintes : définition, techniques, acteurs et autres (dans le cas où certaines contraintes pourraient être ajoutées par le modélisateur sans typage spécifique). Les deux autres méthodes sont :

- *find_definition_and_actor_incompatible_constraints_set(your_model)* : qui permet de ne pas prendre en compte les contraintes techniques, pour savoir s'il existe des contraintes incompatibles liées aux acteurs, notamment vis-à-vis des contraintes de définition.
- *find_definition_and_technical_incompatible_constraints_set(your_model)*: qui permet de ne pas prendre en compte les contraintes liées aux acteurs, pour savoir s'il existe des contraintes incompatibles techniques, notamment vis-à-vis des contraintes de définition.

L'Annexe B présente l'utilisation de ces deux méthodes sur un cas d'application.

III.3.iv Pistes d'amélioration pour l'identification des contraintes selon les typologies

Nous pensons que l'algorithme d'identification des contraintes incompatibles, selon leur typologie, pourrait gagner en efficacité en diminuant le nombre de résolutions du modèle. Une piste serait de réorganiser de manière pertinente les contraintes au début de l'identification. En effet, nos résultats mettent en évidence que les contraintes d'acteurs sont majoritairement incompatibles vis-à-vis de contraintes techniques et de définition. Il serait donc intéressant de mélanger ces types de contraintes dès le début, plutôt que de les séparer.

III.4 Le développement d'une interface graphique

Dans le cadre de nos travaux, nous avons également choisi d'accompagner la conception d'une interface graphique. Avant de présenter l'interface, nous souhaitons proposer quelques modifications et compléments par rapport à la représentation graphique proposée par (Pajot 2019) que nous avons retenue dans le chapitre précédent (cf. II.4.i.c). L'interface est à ce jour en version bêta et seulement une petite partie d'OMEGAAlpes a été développée, principalement la partie technique présentée dans la partie III.1.

III.4.i Propositions de modifications pour la représentation graphique proposée par Pajot

En se basant sur notre expérience d'utilisation, nous souhaitons proposer quelques modifications à la représentation proposée par (Pajot 2019) que nous avons choisi de retenir pour nos travaux. La première modification concerne les couleurs. Dans les projets de valorisation de chaleur, la température de la chaleur produite n'est pas toujours la même que la température nécessaire pour les consommateurs. Par ailleurs, le chaud est souvent représenté en rouge et le froid en bleu. C'est pourquoi, nous proposons pour les flux et unités thermiques d'utiliser du rouge et de pouvoir utiliser

du bleu si plusieurs températures de chaleur doivent être représentées (cf. Tableau 5). L'électricité doit donc changer de couleur et nous proposons d'utiliser du violet en nous basant sur les travaux de (Fito et al. 2020). Nous proposons également une symbolique pour de nouvelles unités énergétiques développées. Une synthèse des symboles est disponible dans la Figure 46.

Vecteur énergétique	Couleurs proposées dans (Pajot 2019)	Nouvelles couleurs proposées
Electricité	Bleu	Violet
Gaz	Jaune	Jaune
Thermique	Rouge	Bleu (froid) -> Rouge (chaud)

Tableau 5 : Modification des couleurs pour la représentation des vecteurs énergétiques | Source : Auteure

Type d'unité	Symbole
Production	
Consommation	
Stockage	
Réversible	

Type d'unité	Nom de l'unité dans OMEGAlpes	Symbole
Non spécifié	EnergyUnit	
Fixe	FixedEnergyUnit	
Variable	VariableEnergyUnit	
Energie en créneau	SquareEnergyUnit	
Energie Déplaçable	ShiftableEnergyUnit	
Energie en triangle	TriangleEnergyUnit	
Energie en dent de scie	SawToothEnergyUnit	
Multiple	SeveralEnergyUnit	
Multiple imaginaire		

Figure 46 : Représentations et symboles pour les unités énergétiques | Source : Auteure basée sur (Pajot 2019)

Les objectifs et les contraintes étant associées à des unités, nous proposons de représenter les contraintes et les objectifs en dessous de l'unité, à l'instar de ce qui est fait dans la représentation UML (cf. Figure 47).

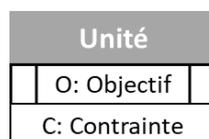


Figure 47 : Association des objectifs et des contraintes aux unités pour la représentation graphique | Source : Auteure

De plus, nous avons mis en évidence le rôle des acteurs, c'est pourquoi il nous paraît également pertinent de les représenter. Nous proposons d'utiliser le formalisme UML pour les acteurs (cf. Figure 48)



Figure 48 : Représentation graphique de l'acteur | Source : Auteure basée sur la représentation UML

III.4.ii Interface graphique OMEGAlpes-Web basée sur cette représentation graphique

Le chapitre II a mis en évidence l'intérêt d'une interface graphique pour faciliter l'accès à la modélisation et pour permettre une représentation du modèle comme support de synchronisation cognitive (cf. II.1.i.d). L'interface graphique OMEGAlpes-Web, développée pour OMEGAlpes, a été réalisée par des étudiants en master Informatique, Mathématiques et Mathématiques Appliquées (IM²AG) de l'Université Grenoble Alpes, dans l'objectif de mettre à disposition un outil d'aide à la modélisation. L'interface graphique doit donc permettre de produire un modèle à partir de la bibliothèque de modèles OMEGAlpes tout d'abord graphiquement, puis en code Python. Pour la représentation graphique, nous avons choisi de nous baser sur les éléments graphiques proposés par (Pajot 2019) et présentés ci-dessus. A l'instar d'OMEGAlpes, le code développé pour l'interface OMEGAlpes-web est disponible sur le Gitlab⁷³.

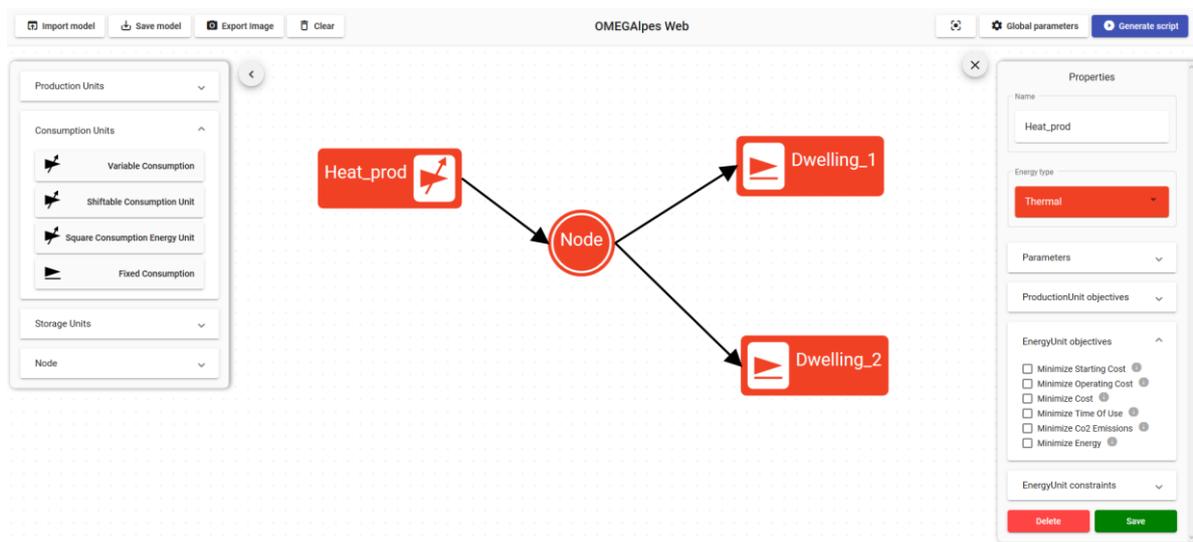


Figure 49 : Capture d'écran de l'interface graphique OMEGAlpes-web | Source : Auteure

L'interface est disponible ici : <https://mhi-srv.g2elab.grenoble-inp.fr/OMEGAlpes-web-front-end/>. Comme le montre la Figure 49, la bibliothèque des modèles disponibles dans OMEGAlpes est proposée sur la gauche. Les modèles d'unités énergétiques sont regroupés selon les catégories. En cliquant sur une unité énergétique, celle-ci apparaît sur le canevas, ainsi qu'un module, placé sur la droite, permettant de modifier les propriétés. Ce module permet de sélectionner et/ou de compléter les éléments associés à cette unité : les paramètres d'entrée, les contraintes, les objectifs. Les unités sont bien sûr à raccorder aux nœuds souhaités. Le modèle peut être enregistré sous format Json pour être

⁷³ Le code correspondant à l'interface (front-end) est disponible ici : <https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes-web-front-end>. Le code correspondant à la production du fichier python (back-end) est disponible ici <https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes-web-back-end>.

réutilisé par la suite. Ainsi un pré-modèle pourrait être fourni et complété à distance pour être testé et modifié par chaque acteur.

Une fois le modèle représenté graphiquement, il suffit de cliquer sur le bouton *Generate*, et de choisir la durée et le pas de temps de la période, pour générer trois fichiers (cf. Figure 50). Le premier est un fichier Json qui fait le lien avec la représentation graphique, le deuxième est un script Python du modèle créé à partir de la lecture du fichier Json, et le troisième est la représentation graphique du modèle sous format .png. Aujourd'hui, il faut lancer le fichier Python par soi-même pour obtenir une solution optimisée. Une amélioration substantielle pourrait être de lancer l'optimisation à distance, permettant ainsi à chaque partie prenante de tester le modèle à distance.

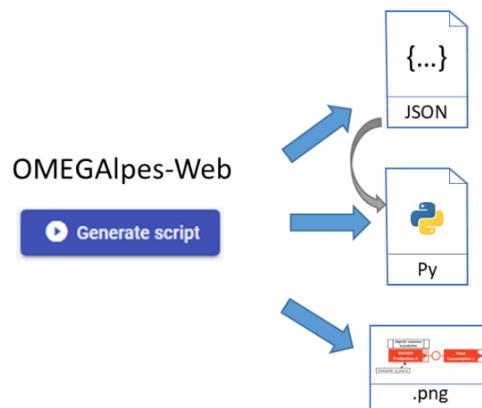


Figure 50 : De l'interface graphique au fichier Python | Source : Auteure

III.4.iii Limites et perspectives pour l'interface graphique

L'interface graphique actuelle est une première proposition visant à tester la génération du code OMEGA|pes à partir d'une représentation graphique. Comme indiqué dans les limites du chapitre précédent (cf. II.5.iv), cette interface ne permet pas de proposer un code spécifique : elle n'est en effet pas très flexible pour une utilisation autre que l'utilisation de la bibliothèque de modèles proposée. Une perspective pour l'interface graphique serait donc de proposer la capacité à développer une partie du code. Par ailleurs, l'interface génère du code, mais ne résout pas directement le problème : il pourrait donc être intéressant d'ajouter cette fonctionnalité. Ensuite, il pourrait être intéressant pour les utilisateurs d'indiquer les variables influentes qui les intéressent. Les résultats de ces variables pourraient être présentés plus directement aux parties prenantes. Enfin, il faudrait mettre à jour l'interface avec les nouvelles propositions pour l'outil : les nouvelles unités énergétiques, la modélisation économique, ou encore la modélisation des acteurs présentée dans la partie suivante.

III.5 Le calcul et la représentation des fronts de Pareto

Dans le chapitre précédent, nous avons également mis en évidence l'importance de représenter le front de Pareto pour un même assemblage. C'est pourquoi nous avons développé au sein d'OMEGA|pes un moyen de pouvoir calculer les fronts de Pareto et de les représenter.

Plusieurs approches sont possibles pour tracer un front de Pareto dans le cas d'un problème d'optimisation : avoir plusieurs fonctions-objectifs à optimiser en parallèle ou avoir une seule fonction-

objectif intégrant l'ensemble des objectifs. Le recours à la modélisation MILP nous amène à considérer l'approche regroupant les objectifs en un unique objectif, car un seul objectif peut être fourni aux solveurs MILP.

(Dinh 2016) détaille deux principales méthodes permettant de tracer un front de Pareto à partir d'un unique objectif : la méthode epsilon-contrainte et la méthode de pondération. Nous verrons que la modélisation MILP amène à considérer la seconde option.

III.5.i Méthode « ε -contrainte » – mal adaptée aux méthodes MILP

La méthode ε -contrainte ne conserve qu'un seul objectif en tant que tel et va transformer les autres « objectifs » en contraintes. (Haimes, Lasdon, et Wismer 1971) expriment la formulation du problème comme suit :

$$\begin{aligned} & \text{Minimiser } f_1(x) \\ & \text{Tel que : } f_i(x) \leq \varepsilon_i \text{ pour } i = 2, \dots, n_f \end{aligned} \quad (6)$$

ε_i représente une borne supérieure pour le $i^{\text{ème}}$ objectif où i est différent de 1

Cependant, dans le cadre d'une modélisation MILP, les variables peuvent être discrètes. Si un objectif est transformé en contrainte pour une valeur epsilon qui n'existe pas, il est alors possible qu'il n'existe pas de solution au nouveau problème posé. Cette méthode peut donc être difficile à utiliser dans une modélisation MILP.

III.5.ii Méthode de pondération pour un ensemble de solutions – adaptée aux méthodes MILP

La méthode de pondération regroupe tous les objectifs en un seul tout en pondérant chacun des objectifs comme présenté dans la formulation suivante. La somme des coefficients de pondération doit alors être égale à 1 :

$$\begin{aligned} & \text{Minimiser } \sum_{i=1}^{n_f} \alpha_i * f_i(x) \\ & \text{tel que: } \sum_{i=1}^{n_f} \alpha_i = 1 \end{aligned}$$

Avec : (7)

n_f le nombre de fonctions objectifs

α_i le coefficient de pondération pour le $i^{\text{ème}}$ objectif

Facile à mettre en œuvre dans le cadre d'une optimisation MILP, cette méthode permet d'obtenir assez facilement le front de Pareto. Il s'agit alors de relancer plusieurs fois le problème d'optimisation avec des valeurs différentes pour les coefficients de pondération α_i (Gong 2011; Dinh 2016). Ayant choisi une optimisation MILP, les temps de résolution sont donc réduits et il n'est pas incohérent de chercher à relancer plusieurs fois l'optimisation. La Figure 51 issue de (Gong 2011) représente un front de Pareto à trois points, calculé pour deux objectifs f_1 et f_2 . L'équation pour tracer ce front de Pareto est la suivante :

$$\text{Minimiser } \alpha_1 * f_1(x) + \alpha_2 * f_2(x)$$

Avec:

$$\alpha_1 = 0, 0.5, 1$$

$$\alpha_2 = 1 - \alpha_1$$

(8)

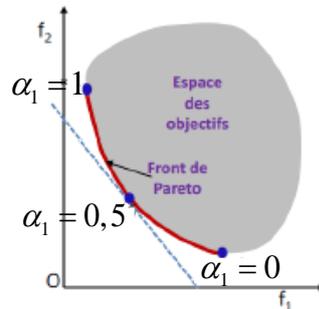


Figure 51 :Front de Pareto par la méthode de pondération | Source : (Gong 2011)

III.5.iii Tracer un front de Pareto pour deux objectifs

Actuellement, nous avons uniquement développé sur OMEGAlpes le moyen de tracer un front de Pareto à partir de deux objectifs. Nous nous sommes basée sur la méthode de pondération.

Le paramètre booléen *pareto* (*False* par définition) a été ajouté aux objectifs⁷⁴. Pour indiquer les objectifs à pondérer, il suffit donc d'indiquer que le paramètre *pareto* est vrai (*True*) lors de la définition de l'objectif. Le front de Pareto étant en deux dimensions, il est nécessaire d'indiquer deux objectifs. On aurait par exemple :

- `production_1.minimiser_production(pareto = True)`, considérons qu'il s'agit de l'objectif_1
- `production_2.minimiser_production(pareto = True)`, considérons qu'il s'agit de l'objectif_2

La méthode pour résoudre le modèle est la même, `solve_and_update`⁷⁵ : il est cependant possible d'indiquer dans les paramètres le pas de variation du coefficient de pondération, appelé `pareto_step`, qui prend par défaut la valeur 0,1. Ainsi, la méthode pour optimiser le modèle `model` avec un pas de variation de 0,01 s'écrit :

- `model.solve_and_update(pareto_step=0.01)`

⁷⁴ Le code est disponible ici : <https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/general/optimisation/elements.py>.

⁷⁵ Le code est disponible ici : <https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/general/optimisation/model.py>.

La méthode calcule la fonction suivante :

$$\alpha_1 * objectif_1 + \alpha_2 * objectif_2$$

Avec

$$\alpha_1 = 0, 0+pareto_step, 0+2*pareto_step, \dots, 1 \quad (9)$$
$$\alpha_2 = 1 - \alpha_1$$

Le modèle va alors être résolu un certain nombre de fois, $1/pareto_step + 1$ pour être exact, via la fonction `_pareto_and_solve` et chaque résolution sera conservée dans l'attribut `pareto_model` du modèle.

Une fois les valeurs des variables calculées, nous avons implémenté la méthode suivante pour tracer un front de Pareto à deux variables⁷⁶ :

- `plot_pareto2D(model, quantity_1, quantity_2)`

Avec `quantity_1` et `quantity_2` les variables correspondant au front de Pareto à tracer.

III.5.iv Tracer d'autres fronts de Pareto

Actuellement il est possible de tracer un front de Pareto 2D. Il pourrait être intéressant de proposer de tracer un front de Pareto 3D ou de représenter les solutions sur un pareto-sliders. Il pourrait également être intéressant de pouvoir facilement comparer les fronts de Pareto sur un même graphique.

Conclusion du chapitre III

Ce troisième chapitre fait écho au chapitre II en proposant des algorithmes, des méthodes, des outils faisant suite aux besoins mis en évidence dans le chapitre précédent pour accompagner la négociation et la synchronisation cognitive entre les parties prenantes. En nous basant sur la cartographie des métamodèleurs d'optimisation, nous avons choisi de travailler avec OMEGAlpes, que nous présentons plus en détail dans notre première partie. Nous présentons ensuite des développements réalisés sur cet outil : la possibilité de réaliser un dimensionnement « imaginaire » pour faciliter la résolution ; la possibilité d'identifier des contraintes rendant le problème infaisable et également de connaître leur typologie associée à leur degré de négociabilité (physique ou de définition, technique, acteur) ; la possibilité de modéliser graphiquement un problème d'optimisation à partir d'une interface graphique ; et enfin la possibilité de tracer automatiquement un front de Pareto pour comparer les

⁷⁶ Le code est disponible ici : <https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/general/utils/plots.py>.

solutions. Nous avons également cherché à identifier les limites et à proposer des pistes d'amélioration pour ces développements.

Dans ces propositions de développement, nous n'avons pas fait référence aux acteurs, pourtant très importants, comme nous l'avons écrit dans notre premier chapitre. Ce sera donc le sujet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV

Architecture d'un modèle multiacteur pour les parties prenantes d'un SELBC, développé pour les métamodeleurs d'optimisation

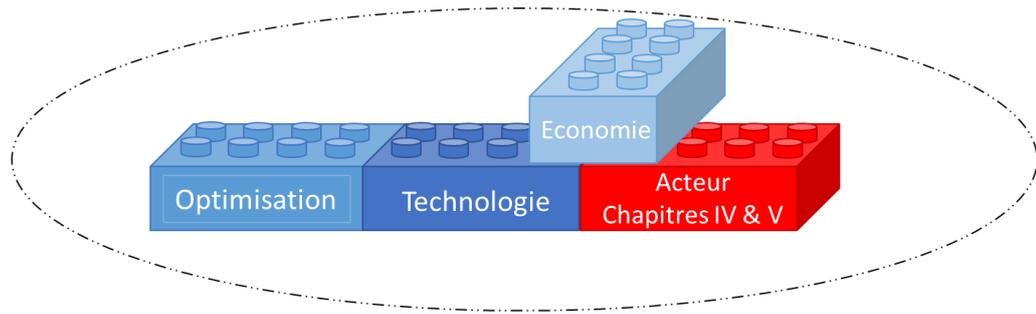
IV.1	LA PRISE EN COMPTE DES ACTEURS DANS LES OUTILS D'AIDE A LA CONCEPTION.....	116
IV.1.i	<i>La prise en compte des acteurs au sein des métamodeleurs identifiés</i>	116
IV.1.ii	<i>La prise en compte des acteurs dans les outils d'aide à la conception, identifiée à partir d'une recherche par mots clefs.....</i>	117
IV.1.iii	<i>La modélisation multiagent : de l'action à l'interaction</i>	121
IV.1.iv	<i>Synthèse et choix pour un modèle multiacteur dans la modélisation des SELBC.....</i>	123
IV.2	PROPOSITION D'UN MODELE POUR LES ACTEURS : MODELISATION PARCIMONIEUSE ET EFFECTIVE BASEE SUR LA MODELISATION ORIENTEE OBJET ET LE CONCEPT DE NŒUD SOCIO-ENERGETIQUE	124
IV.2.i	<i>Différencier les questions techniques des questions liées aux acteurs et différencier les décisions portées par type d'acteur</i>	124
IV.2.ii	<i>De l'acteur aux « raisons influentes » jusqu'à la modélisation des contraintes et des objectifs ..</i>	126
IV.2.iii	<i>Modèle basé sur une approche orientée objet : la classe mère Actor</i>	126
IV.2.iv	<i>Modèle limité aux parties prenantes</i>	128
IV.2.v	<i>Séparation en trois typologies de parties prenantes : régulateurs, opérateurs et développeurs .</i>	128
IV.2.vi	<i>Prise en compte des nœuds socio-énergétiques des acteurs opérateurs via le domaine de responsabilité</i>	129
IV.2.vii	<i>Modéliser les parties prenantes associées au SELBC avec OMEGAAlpes.....</i>	132
IV.3	LIMITES DU MODELE D'ACTEUR PROPOSE	133
IV.3.i	<i>Un modèle très partiel des acteurs, considéré (positivement) comme « parcimonieux » et « effectif ».....</i>	133
IV.3.ii	<i>Une sélection des acteurs modélisés</i>	134
IV.3.iii	<i>Une complexification du processus de modélisation et du modèle</i>	135
	CONCLUSION DU CHAPITRE IV	135

Chapitre IV. Architecture d'un modèle multiacteur pour les parties prenantes d'un SELBC, développé pour les métamodeleurs d'optimisation

Le premier chapitre a mis en évidence la dimension multiacteur des systèmes énergétiques locaux bas-carbone. Le troisième paradoxe que nous avons mis en évidence fait état de l'absence de prise en compte explicite de cette spécificité dans les modèles (cf. I.5.iii). Ce chapitre est une proposition de modèle permettant de prendre en compte les parties prenantes des SELBC de manière explicite dans les outils d'aide à la conception. Le second chapitre ayant mis en évidence l'intérêt des métamodeleurs d'optimisation pour la conception des SELBC, le modèle proposé s'adapte donc à ce cadre. Modéliser les parties prenantes de manière explicite peut être fait de nombreuses manières et répondre à de nombreux besoins. Pour cette thèse, nous cherchons à répondre aux besoins mis en évidence par les différents paradoxes, et notamment celui de donner aux outils d'aide à la conception un statut d'outil de négociation. Il s'agit notamment de proposer une modélisation permettant d'assurer aux parties prenantes du projet qu'il existe au moins une solution.

Pour une meilleure compréhension de nos travaux, nous distinguons quatre termes : celui d'« acteur », de « partie prenante », de « modèle d'acteurs », et de « modèle multiacteur », que nous définissons comme suit. **Nous appelons « acteur » toute personne physique ou morale concernée par le SELBC. Nous appelons « partie prenante » un décideur ou un ensemble de décideurs pouvant avoir une influence substantielle sur la forme du SELBC.** Il s'agit donc d'une sous-catégorie de la catégorie « acteur ». Un modèle simplifié pourra être associé aux acteurs ou aux parties prenantes. **Nous appelons « modèle d'acteur », un modèle visant à représenter un acteur. Si plusieurs modèles d'acteurs coexistent, nous considérons qu'il s'agit d'un « modèle multiacteur ».**

Dans le cadre de nos travaux, nous avons cherché à savoir comment proposer un modèle générique pour les parties prenantes, adapté aux métamodeleurs d'optimisation, dans un contexte de conception multipartie prenante. Et ce, dans l'idée de proposer une bibliothèque de modèles multiacteur. Nous avons travaillé sur trois axes en parallèle : mieux comprendre les acteurs des SELBC (cf. I.3), comprendre ce qui peut être modélisé dans la perspective d'une négociation entre les parties prenantes (cf. II.2), et enfin connaître les modèles d'acteurs dans les outils d'aide à la conception que nous abordons dans ce chapitre. La première partie de ce chapitre présente la prise en compte des acteurs dans les outils d'aide à la conception (IV.1). Cet état de l'art est suivi de notre proposition de modèle multiacteur présenté dans la deuxième partie (IV.2). Ce modèle est principalement basé sur la modélisation orientée objet (cf. II.1.i.a et II.1.iii) et la théorie des nœuds socio-énergétiques (cf. I.3.iii.a). Ce chapitre se conclut en mettant en évidence plusieurs limites au modèle proposé (IV.3).



Légende



Briques de base du métamodeleur OMEGAAlpes



Nouvelle brique pour le métamodeleur OMEGAAlpes

Figure 52 : Apport du chapitre IV : un modèle multiacteur explicite pour la modélisation des SELBC | Source : Auteure

IV.1 La prise en compte des acteurs dans les outils d'aide à la conception

Cette partie s'intéresse aux modèles d'acteurs proposés dans les outils d'aide à la conception. Parmi les métamodeleurs identifiés dans la sous-partie II.1.v, la prise en compte du caractère multiacteur des systèmes énergétiques n'est envisagée que pour deux métamodeleurs (IV.1.i). Les modèles associés n'étant pas accessibles ou encore développés, il nous a semblé nécessaire de compléter cet état de l'art. Pour cela, nous avons réalisé une recherche par mots clefs dans l'idée d'identifier des modèles d'acteurs dans un contexte multiacteur (IV.1.ii). Enfin, nous revenons sur la modélisation multiagent, rencontrée à plusieurs reprises, et qui propose des modèles multiacteurs (IV.1.iii). Dans le but d'apporter un regard plus complet, nous nous sommes appuyée à la fois sur des travaux réalisés en sciences de l'ingénieur et sur des travaux réalisés en sciences sociales.

IV.1.i La prise en compte des acteurs au sein des métamodeleurs identifiés

Seuls deux métamodeleurs (en plus d'OMEGAAlpes) envisagent la prise en compte des parties prenantes dans les outils. Il s'agit de DER-CAM et d'oemof. DER-CAM propose une modélisation différenciant les propriétaires des sous-systèmes énergétiques du réseau dans le but de satisfaire l'ensemble des propriétaires, et non un seul. Il s'agit d'optimiser le modèle, afin que les avantages et les coûts soient répartis de manière équitable et proportionnelle à l'activité de chaque participant⁷⁷. Le code n'étant pas disponible, nous n'avons pas pu investiguer plus en détail cette démarche. Oemof propose de développer un modèle d'acteurs basé sur de la modélisation multiagent (Simon Hilpert 2016) (la modélisation multiagent est présentée plus loin cf. IV.1.iii). Au moment de nos recherches, la modélisation est encore à l'étape d'intention et n'est pas effective dans l'outil. Enfin, OMEGAAlpes

⁷⁷ Berkeley Lab, page « Modeling Multiple Ownership Microgrids: Use-cases for applying DER-CAM to various microgrid ownership models », consulté le 30 novembre 2018, <https://building-microgrid.lbl.gov/sites/default/files/DER-CAM%20Ownership%20Use%20Cases.pdf>.

n'avait pas à l'origine de modélisation multiacteur proposée. La modélisation multiacteur actuelle est celle que nous présentons dans la suite de ce chapitre (cf. IV.2).

IV.1.ii La prise en compte des acteurs dans les outils d'aide à la conception, identifiée à partir d'une recherche par mots clefs

Pour compléter l'état de l'art sur les modèles multiacteurs, nous avons réalisé une recherche par mots clefs sur ScienceDirect⁷⁸, indiquant les termes suivants dans la rubrique « titre, résumé et mots clefs » :

- « model » & « multi-stakeholder »,
- « model » & « multi-actor »,
- « energy » & « model » & « multi-stakeholder », ou encore
- « energy » & « model » & « multi-actor ».

L'objectif était d'identifier des modèles (« model ») associables à des acteurs dans un contexte multiacteur (« multi-actor » ou « multi-stakeholder ») pour des outils logiciels d'aide à la conception. Pour mieux cerner les modèles produits dans notre domaine de recherche, le mot « energy » a été ajouté. Le Tableau 6 indique le nombre d'articles identifiés pour chaque catégorie. Cependant, comme nous le présentons un peu plus loin, les articles ne se réfèrent pas tous à une modélisation associée aux acteurs, mais plus généralement à l'importance d'une prise en compte de la multiplicité des acteurs dans les projets énergétiques.

Mots clefs	Nombre d'articles identifiés
« model » & « multi-stakeholder »	214
« model » & « multi-actor »	76
« energy » & « model » & « multi-stakeholder »	29
« energy » & « model » & « multi-actor »	11

Tableau 6 : Nombre d'articles identifiés en fonction des mots clefs | Source : Auteure

La Figure 53, obtenue à partir des mêmes recherches par mots clefs, met en évidence l'intérêt grandissant depuis plusieurs années pour une prise en compte de la multiplicité des acteurs. **Nous pouvons cependant voir que cela reste une niche, notamment dans le domaine de l'énergie, où le nombre de publications ne dépasse pas la dizaine d'articles.**

⁷⁸ Elsevier B.V., page « ScienceDirect », *ScienceDirect*, consultée en juillet 2020, <https://www.sciencedirect.com>.

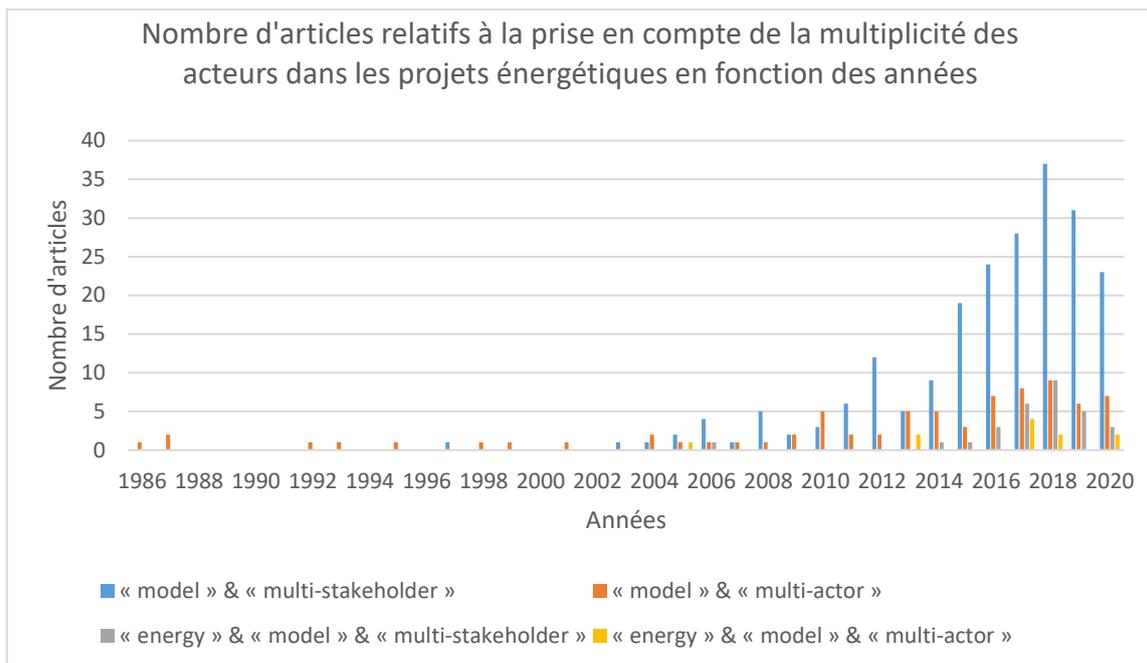


Figure 53 : Répartition des articles au cours du temps selon les mots clefs | Source : Auteure

IV.1.ii.a Quatre approches pour la prise en compte des parties prenantes dans le cadre des projets énergétiques

Parmi les 40 articles identifiés via les mots clefs « energy » & « model » & « multi-stakeholder » ou « energy » & « model » & « multi-actor », nous différencions quatre grandes approches pour la prise en compte des parties prenantes dans le cadre des projets énergétiques (le détail des articles identifiés pour chaque catégorie est précisé dans l'Annexe C) :

- la proposition de modèles multiacteurs, à l'instar de notre démarche dans le cadre de cette thèse,
- l'analyse comparative d'études selon plusieurs acteurs,
- l'intégration d'acteurs dans le processus de modélisation, à l'instar de ce que nous cherchons à faire, comme le détaille le chapitre II,
- la discussion avec plusieurs experts sur le processus de modélisation ou le modèle.

Approche pour la prise en compte du caractère multiacteur	Nombres d'articles « multi-stakeholder »	Nombres d'articles « multi-actor »
Modèle multiacteur	8 (dont 3 portés par une même équipe de chercheurs)	5
Analyse comparative d'études de manière multiacteur	8	5
Intégration d'acteurs dans le processus de modélisation	4	2
Discussion avec des experts sur le processus de modélisation ou le modèle	4	1

Tableau 7 : Nombres d'articles identifiés en fonction de l'approche proposée pour la prise en compte de la multiplicité des acteurs | Source : Auteure

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux modèles multiacteurs proposés dans les outils, nous nous intéressons donc aux articles regroupés dans la catégorie « modèle multiacteur ».

IV.1.ii.b Deux catégories de modèles identifiées : la modélisation d'actions et la modélisation d'objectifs

Malgré le faible nombre d'articles regroupés dans la catégorie « modèle multiacteur », nous nous sommes confrontée à une grande diversité d'objectifs, d'approches et de modèles proposés pour les acteurs. **Il nous semble cependant que deux approches de modélisation peuvent être distinguées : d'un côté, certains auteurs modélisent des actions réalisées par les acteurs du projet, qui sont amenées à changer selon des conditions, de l'autre, ils modélisent les objectifs des acteurs.**

La modélisation d'actions

Nous avons identifié cinq articles modélisant les actions des acteurs, ou leurs prises de décisions, en fonction de conditions qui orientent alors le choix des acteurs (C. Weber, Maréchal, et Favrat 2007; F. G. N. Li 2017; Hinker et al. 2017; Yang, Shi, et Li 2018; Kong et al. 2020)⁷⁹. Les conditions peuvent être propres aux acteurs (C. Weber, Maréchal, et Favrat 2007; F. G. N. Li 2017; Hinker et al. 2017; Yang, Shi, et Li 2018; Kong et al. 2020) ou extérieures (C. Weber, Maréchal, et Favrat 2007; Hinker et al. 2017; Kong et al. 2020). Pour (Hinker et al. 2017), il s'agit d'accompagner la conception de projets énergétiques en prenant en compte les actions des acteurs. Pour les quatre autres articles il s'agit principalement d'analyser sur le long terme l'impact des actions réalisées par les acteurs. (Hinker et al. 2017; F. G. N. Li 2017; Kong et al. 2020) se basent sur de la simulation multiagent, et (Yang, Shi, et Li 2018) se basent sur la théorie des jeux.

À titre d'illustration, nous présentons la modélisation proposée par (Kong et al. 2020). L'article s'intéresse à l'effet des politiques publiques sur le développement des véhicules électriques, et plus particulièrement sur l'achat par les consommateurs, qui sont donc modélisés. La modélisation est la suivante :

$$\begin{aligned} U_{EV} &= \theta_{EV} * g_{EV} - \tau_{EV} * LCC_{EV} \\ U_{CV} &= \theta_{CV} * g_{CV} - \tau_{CV} * (LCC_{CV} + T_{CV}) \\ U_{NO} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

⁷⁹ Il est à noter que, bien que l'article (Yang, Shi, et Li 2018) emploie le mot « energy » dans son résumé, il n'a pas de lien avec la production ou la consommation d'énergie. L'article s'intéresse à la coopération entre plusieurs acteurs vis-à-vis de la propriété intellectuelle.

Avec:

U_{EV} , U_{CV} et U_{NO} le niveau de satisfaction du consommateur à acheter un véhicule électrique (EV), un véhicule conventionnel (CV) ou rien (NO)

g_{EV} et g_{CV} l'intérêt environnemental des véhicules

θ_{EV} et θ_{CV} la conscience environnemental des consommateurs

τ_{EV} et τ_{CV} la sensibilité du consommateur au prix des véhicules

LCC_{EV} et LCC_{CV} le coût du cycle de vie des véhicules

T_{CV} le degré de restriction environnemental pour les voitures conventionnelles

Ainsi, l'action d'achat d'une voiture conventionnelle U_{CV} , ou d'une voiture électrique U_{EV} , dépend de la conscience environnementale des acteurs θ , de la sensibilité des acteurs au prix du véhicule τ (deux conditions propres aux acteurs), ainsi que de l'intérêt environnemental du véhicule g , du coût du cycle de vie du véhicule LCC , et des restrictions politiques envers les véhicules thermiques T (trois conditions extérieures aux acteurs).

La modélisation d'objectifs

Les huit autres articles modélisent les objectifs des acteurs (González-Bravo, Fuentes-Cortés, et Ponce-Ortega 2017; Sánchez-Bautista et al. 2017; Fuentes-Cortés, Ponce-Ortega, et Zavala 2018; Huang et al. 2018; Hernández-Romero, Fuentes-Cortés, et Nápoles-Rivera 2019; L. Wang et al. 2019; Santibañez-Aguilar et al. 2020; N. Wang, Heijnen, et Imhof 2020). Travaillant sur des problèmes d'optimisation, les objectifs des acteurs sont modélisés via les objectifs du problème d'optimisation. Deux articles proposent de modéliser un objectif spécifique par type d'acteur (Huang et al. 2018; L. Wang et al. 2019), les autres proposent de modéliser une unique fonction-objectif au sein de laquelle il s'agit de faire varier les poids des objectifs selon l'acteur (González-Bravo, Fuentes-Cortés, et Ponce-Ortega 2017; Sánchez-Bautista et al. 2017; Fuentes-Cortés, Ponce-Ortega, et Zavala 2018; Hernández-Romero, Fuentes-Cortés, et Nápoles-Rivera 2019; Santibañez-Aguilar et al. 2020; N. Wang, Heijnen, et Imhof 2020)⁸⁰. Dans le second cas, l'optimisation est réalisée plusieurs fois, une pour chaque acteur, permettant de tracer un front de Pareto correspondant aux solutions optimales.

Nous présentons, à titre d'illustration, la modélisation proposée par (González-Bravo, Fuentes-Cortés, et Ponce-Ortega 2017) basée sur une unique fonction-objectif (cf. Figure 54) :

$$\text{fonction-objectif} = w^{eco} * \max \text{AnnualProfit} + w^{amb} * \min \text{OGHGE} + w^{soc} * \max \text{ONJobs} \quad (11)$$

Avec :

AnnualProfit : le profit annuel

OGHGE : les dégats environnementaux

ONJobs : l'acceptabilité sociale

w^{eco} , w^{amb} , w^{soc} : le poids des objectifs

⁸⁰ Il est à noter que trois articles sur les quatre sont issus de la même équipe de recherche.

Stakeholders	w^{eco}	w^{amb}	w^{soc}
0	1	1	1
1	1	0	0
2	0	1	0
3	0	0	1
4	0.33	0.33	0.33
5	0.5	0.5	0
6	0	0.5	0.5
7	0.5	0	0.5
8	0.7	0.3	0
9	0.3	0.7	0
10	0	0.3	0.7
11	0.7	0	0.3
12	0.3	0	0.7
13	0.15	0.7	0.15
14	0.7	0.15	0.15
15	0.15	0.15	0.7
16	0.2	0.2	0.6
17	0.2	0.6	0.2
18	0.6	0.2	0.2
19	0.35	0.35	0.3
20	0.8	0.1	0.1

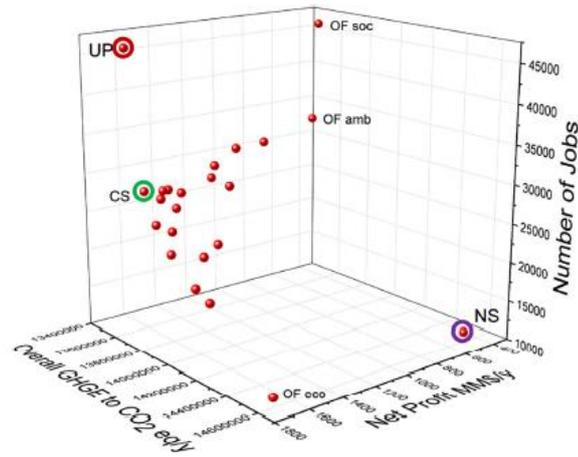


Figure 54 : Poids des objectifs selon les acteurs et représentation graphique des solutions | Source : (González-Bravo, Fuentes-Cortés, et Ponce-Ortega 2017)

Pour permettre de comparer les solutions obtenues pour chaque acteur, les auteurs proposent de calculer le point idéal (UP = Utopia Point) correspondant au point optimal pour chaque objectif calculé séparément. (Recht 2016) indique qu'« en minimisation multicritère, ces coordonnées correspondront aux bornes inférieures, et en maximisation, aux bornes supérieures. En général, ce point n'appartient pas à une solution du problème, sauf si les critères ne sont pas en conflit. Lorsqu'il est connu, ce point de référence peut permettre de guider le processus d'exploration ». Les auteurs proposent également de calculer le point Nadir (NS = Nadir solution) qui « peut être vu comme le point contraire au point idéal » (Recht 2016). Selon (Recht 2016), « en minimisation multicritère, ses coordonnées correspondront ainsi aux bornes supérieures des critères d'optimisation, et en maximisation, aux bornes inférieures. Tout comme le point idéal, ce point n'est généralement pas une solution du problème d'optimisation, et est donc différent de la plus mauvaise solution existant sur l'espace de recherche. La connaissance de ce point permet de restreindre l'exploration en bornant les performances des solutions ». Enfin, les auteurs proposent d'identifier une solution de « compromis » (CS = Compromised Solution). Dans d'autres articles, les auteurs proposent de compléter les études en identifiant une solution minimisant l'insatisfaction des acteurs (Sánchez-Bautista et al. 2017; Fuentes-Cortés, Ponce-Ortega, et Zavala 2018).

IV.1.iii La modélisation multiagent : de l'action à l'interaction

Nous avons pu identifier, via le métamodeleur oemof ou via les articles, la modélisation multiagent. Cette modélisation étant largement diffusée et utilisée, il nous semble nécessaire de la détailler. La modélisation multiagent consiste à représenter, dans le modèle, les actions d'entités autonomes. Ces entités sont appelées des agents. Cette modélisation rejoint ainsi la première catégorie de modèles identifiée dans la sous-partie précédente consistant à modéliser des actions. Selon (Ferber 1997; Camus 2015) la modélisation multiagent « permet de représenter chaque entité d'un système comme un agent autonome ayant un comportement propre et évoluant dans un environnement ». Au-delà des actions des agents, cette modélisation permet de représenter les interactions entre les agents et l'environnement au cours du temps.

La modélisation multiagent ne se restreint pas à la modélisation des actions portés par les acteurs. Ainsi, dans le domaine de l'énergie, les unités énergétiques tels qu'un panneau photovoltaïque, un onduleur, un stockage... peuvent être agents (Vázquez-Canteli et al. 2019). Dans le cadre de notre état de l'art, nous nous intéressons cependant uniquement à la modélisation associée à des acteurs.

L'agent est alors une représentation d'un ou plusieurs acteurs, modélisés par un ensemble d'attributs et d'actions possibles lui permettant d'agir avec le système extérieur à son entité. Il peut exister de nombreux types d'attributs : objectifs, savoirs... et de nombreuses actions conditionnelles ou non, en lien avec d'autres agents du système ou avec l'environnement (cf. Figure 55 et Figure 56).

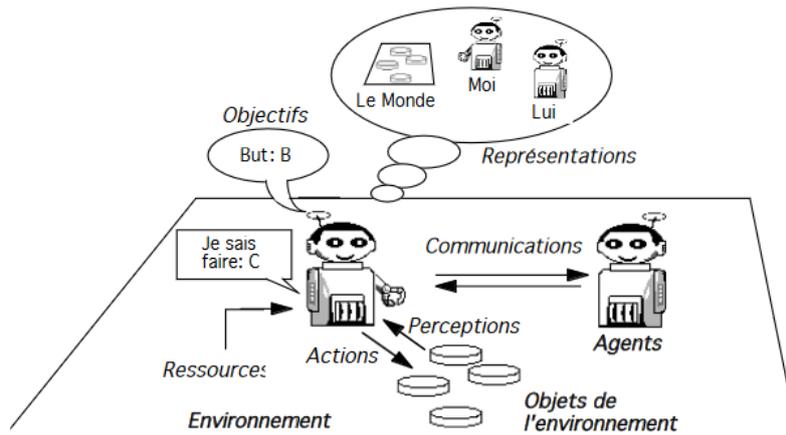


Figure 55 : Représentation imagée d'un agent en interaction avec son environnement et les autres agents | Source : (Ferber 1997)

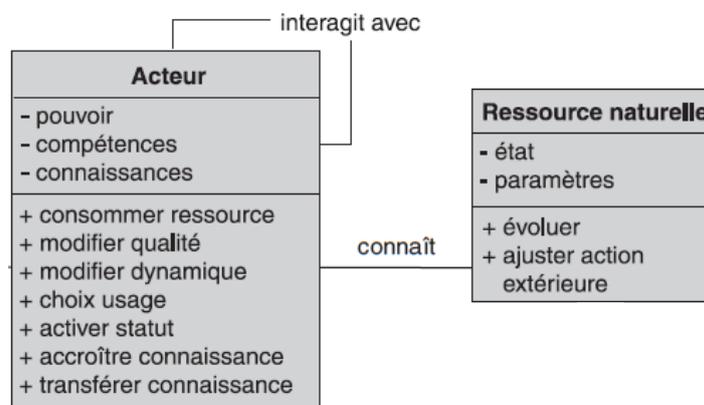


Figure 56 : Classe de l'acteur dans le cadre de la démarche Commod et lien de connaissance avec les ressources naturelles | Source : (Barreteau et al. 2010)

Selon les besoins, la modélisation d'un acteur peut être peu ou très détaillée. Comme toute modélisation, elle ne sera cependant jamais entière. La modélisation de l'acteur peut être très chronophage et nécessite de connaître les actions et les comportements des acteurs dans les différentes situations.

Cette modélisation est principalement utilisée pour modéliser des systèmes complexes. Les systèmes complexes peuvent être définis comme des systèmes difficiles à comprendre, difficiles à prédire et difficiles à décrire (Chazelle 2012; Camus 2015). La modélisation multiagent est utilisée dans l'idée :

- d'expliquer un phénomène (Bousquet, Le Page, et Müller 2002),
- de pouvoir anticiper un phénomène (Gangat et al. 2009), notamment en montrant « ce qui pourrait arriver si ».

La modélisation multiagent est utilisée à l'échelle de populations au sein desquelles il est difficile d'identifier des individus particuliers. C'est ainsi que (Gangat et al. 2009) l'utilisent pour simuler l'aménagement énergétique d'un territoire ou que (Page et al. 2010) l'utilisent sur des cas d'étude dans le but de permettre aux acteurs locaux et aux populations de comprendre l'impact de leurs actions sur les ressources locales sur le long terme.

Dans la plupart des cas, la modélisation multiagent n'a pas vocation à être support de négociation entre les parties prenantes. Cependant, le projet de recherche porté par le CIRAD se base sur la modélisation multiagent comme support de négociation. Il s'agit du projet Comnod proposant une « modélisation d'accompagnement » (Barreteau et al. 2010). Dans ce cadre, le modèle, conçu par les parties prenantes, vise à faire comprendre à ces dernières l'impact de leurs actions sur le long terme vis-à-vis des ressources présentes sur le territoire.

IV.1.iv Synthèse et choix pour un modèle multiacteur dans la modélisation des SELBC

L'état de l'art nous a amené à distinguer deux principales approches de modélisation : modéliser les actions des acteurs du projet ainsi que les interactions avec les autres acteurs et l'environnement ; et modéliser les objectifs (possiblement divergents) des acteurs. Comme précisé dans le deuxième paradoxe (cf. I.5.ii), l'outil d'aide à la conception doit permettre d'assurer aux parties prenantes du projet qu'il existe au moins une solution (pour le modèle proposé et donc selon les contraintes physiques, techniques et celles portées par les acteurs) conforme à leurs objectifs (ou donnant lieu à des compromis entre les objectifs, acceptables pour toutes les parties prenantes).

La modélisation des actions et des interactions des acteurs (qui seraient dans notre cas : le choix d'une technologie, la mise en marche d'une production plutôt qu'une autre...) nous semble trop détaillée par rapport à l'échelle spatiale réduite des SELBC, au faible nombre d'acteurs impliqués (au total, à distinguer de leur diversité) et à la phase de pré-étude dans laquelle l'utilisation de l'outil se place. Par ailleurs, la modélisation des actions est majoritairement associée à de la simulation, notamment pour la simulation multiagent. Or nous avons mis en évidence dans la sous-partie II.1.iv notre intérêt pour l'optimisation permettant une résolution relativement rapide du modèle. Le couplage avec de la simulation modélisant le choix des acteurs, telle que la simulation multiagent, ralentirait fortement la résolution du problème, diminuant l'intérêt de prendre en compte les acteurs dans le modèle.

Il nous semble intéressant de conserver la modélisation d'objectifs pour les acteurs. Ayant mis en évidence l'importance du rôle des acteurs dans le cas des SELBC (cf. I.3.iii), il nous semble pertinent d'identifier des objectifs par type d'acteurs. Par ailleurs, nous avons mis en évidence dans la sous partie II.2.iii l'importance des contraintes. Il nous semble donc nécessaire d'associer au modèle d'acteurs les contraintes. **Afin de garder une modélisation simple, mais adaptée à nos besoins de négociation, nous avons donc choisi de proposer une autre modélisation que nous présentons dans la partie suivante.**

IV.2 Proposition d'un modèle pour les acteurs : modélisation parcimonieuse et effective basée sur la modélisation orientée objet et le concept de nœud socio-énergétique

Cette partie présente l'architecture du modèle d'acteurs que nous proposons pour les métamodéleurs d'optimisation pour la conception, en phase de pré-étude, des SELBC. Un modèle explicite pour les acteurs vise à permettre de différencier les questions techniques des questions liées aux acteurs ainsi qu'à différencier les décisions portées par chaque acteur (IV.2.i). **Ce modèle ne cherche pas à modéliser les acteurs en tant que tels, mais se restreint aux raisons portées par les acteurs, qui influencent la forme du SELBC que nous appelons « raisons influentes ».** Ces raisons influentes sont modélisées via les contraintes et les objectifs au sein du problème d'optimisation (IV.2.ii). Nous basant sur la programmation orientée objet, nous avons alors développé une nouvelle classe *Actor*, de laquelle seront développés les classes et instances liées aux acteurs (IV.2.iii). Pour des raisons d'effectivité du modèle, nous proposons de nous limiter à ne modéliser que les parties prenantes (acteurs ayant une influence substantielle sur la forme du projet) et non l'ensemble des acteurs du SELBC (IV.2.iv). En suivant les catégories présentées dans le chapitre I pour les parties prenantes (cf. I.3.iii.c), nous proposons de développer trois types de modèles pour les parties prenantes : le modèle associé aux développeurs, celui pour les régulateurs et celui pour les opérateurs (IV.2.v). La notion de nœud socio-énergétique (cf. I.3.iii.a) nous amène à compléter le modèle associé aux opérateurs, afin de limiter l'influence de leurs décisions aux unités énergétiques composant leur nœud (IV.2.vi).

Les modèles d'acteurs développés sont disponibles au sein de la bibliothèque de modèles OMEGAlpes⁸¹. Nous présentons succinctement, dans une dernière sous-partie, la manière de modéliser une partie prenante à partir de la bibliothèque de modèles OMEGAlpes (IV.2.vii).

IV.2.i Différencier les questions techniques des questions liées aux acteurs et différencier les décisions portées par type d'acteur

Modéliser de manière explicite les acteurs vise à permettre de distinguer les questions techniques des questions liées aux acteurs. D'un point de vue modélisation, il s'agit de pouvoir différencier la partie du modèle associée à la technique de la partie du modèle associée aux acteurs (étapes « Technical model design » et « Actor model design » Figure 57). Selon nous, cette approche vise à amener les parties prenantes à s'interroger, lors de la modélisation, sur ce qui est technique et ce qui est lié aux acteurs. Il s'agit également de chercher à accompagner les négociations entre parties prenantes en identifiant s'il s'agit de questions liées à la technique ou aux acteurs (étape de décision selon le type de contrainte « Constraint Type ? » Figure 57). Cette approche renvoie notamment à la méthode présentée dans la partie III.3.i visant à différencier les contraintes de définition, techniques et liées aux acteurs.

⁸¹ Le code est disponible ici : <https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/actor>.

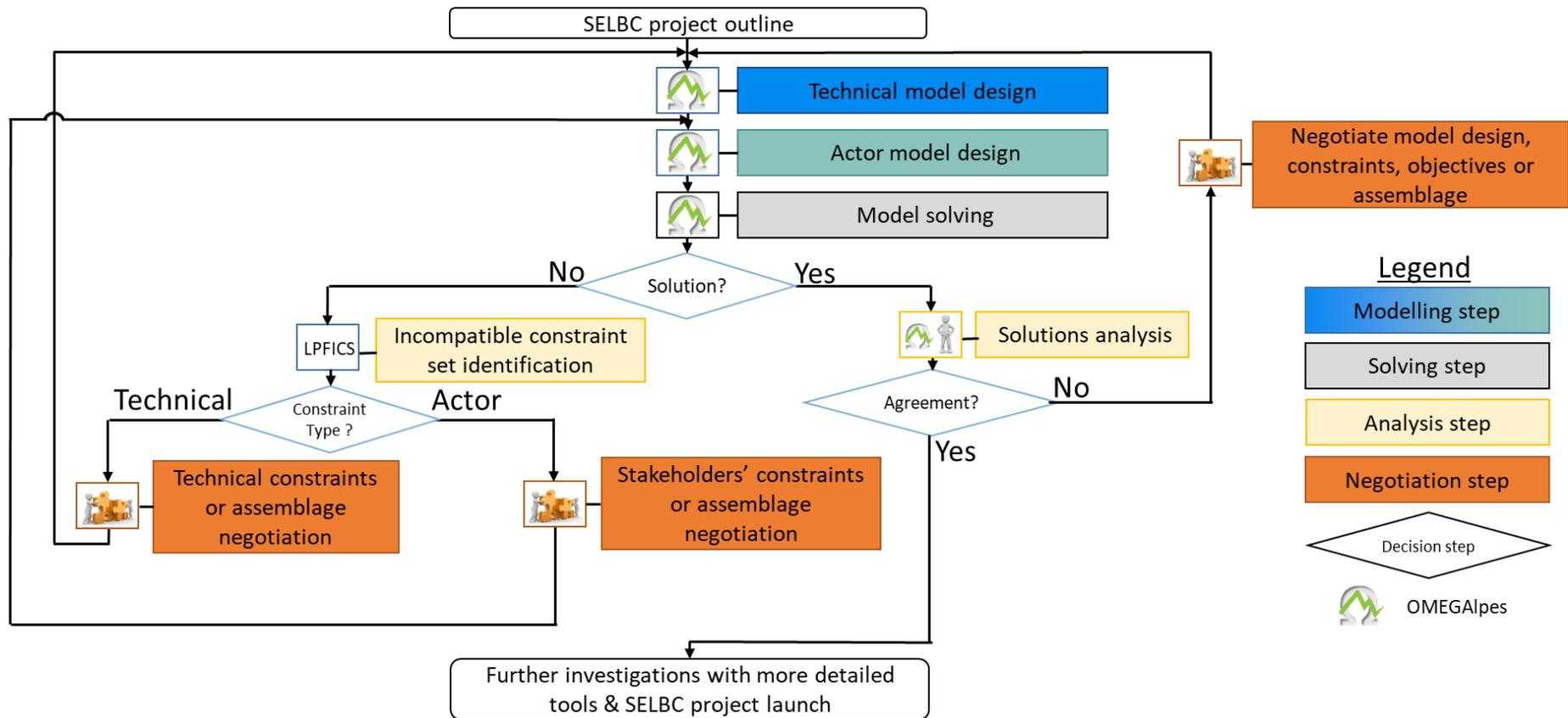


Figure 57 : Différencier les questions techniques des questions liées aux acteurs et différencier les décisions portées par chaque acteur : s'interroger lors de la modélisation et faciliter les négociations | Source : Auteure

Au-delà de la différenciation entre les questions techniques et les questions liées aux acteurs, il s'agit également de distinguer les décisions portées par chaque acteur du SELBC. En effet, le modèle d'acteur que nous souhaitons proposer doit permettre de distinguer les différents acteurs du projet et leur influence sur le projet. Encore une fois, il s'agit d'amener les parties prenantes à s'interroger, lors de la modélisation, sur les décisions qu'elles prennent vis-à-vis du SELBC ; et lors de la résolution, sur l'influence de leurs décisions sur la forme du SELBC. La négociation peut être facilitée car les décisions sont alors associées aux parties prenantes concernées (étape « Incompatible constraint set identification according to stakeholders » Figure 57, qui permettrait alors d'identifier les contraintes incompatibles selon les acteurs).

IV.2.ii De l'acteur aux « raisons influentes » jusqu'à la modélisation des contraintes et des objectifs

Dans un esprit de parcimonie et d'effectivité (facilitant la formulation et la résolution du problème), nous avons choisi de restreindre la modélisation associée aux acteurs à l'influence qu'ils peuvent avoir sur la forme du SELBC. En effet, ce sont les décisions prises par les acteurs qui modifient la forme de l'assemblage, que nous nommons « raisons influentes », qui nous intéressent dans le cadre de la conception des SELBC. Nous ne cherchons pas à modéliser les acteurs, mais à modéliser les raisons influentes qu'ils portent.

Comme nous l'avons vu dans la partie II.2, les solutions identifiées par un outil d'optimisation dépendent des données d'entrées, du choix des variables, des contraintes et des objectifs. La modélisation des raisons influentes peut donc se faire via ces éléments. Les données d'entrées et les variables étant choisies en commun, dans la configuration de l'outil que nous proposons, il ne nous semble pas opportun de les associer à un type d'acteur. **En revanche, les contraintes et les objectifs nous paraissent des éléments pertinents pour modéliser les raisons influentes (a minima une partie).** En effet, dans la sous-partie II.2.iii, nous avons mis en exergue le fait que les contraintes puissent réduire drastiquement le domaine de faisabilité et qu'il était donc important de distinguer les contraintes portées par les acteurs. Par ailleurs, la modélisation d'acteurs via des objectifs est déjà réalisée dans la littérature (cf. IV.1.ii.b).

Pour rappel, nous considérons une contrainte comme une relation (sous forme d'équation) qui réduit le champ des possibles et des possibilités de l'assemblage socio-énergétique, et un objectif comme une orientation (maximiser ou minimiser) de variables tendant à déplacer le point de convergence calculé au sein du domaine de faisabilité. Alors que certaines contraintes physiques ou techniques peuvent être associées à des objets techniques, nous considérons que l'ensemble des objectifs du modèle doivent être portés par des acteurs, car un objet technique ne peut pas avoir d'objectif propre.

IV.2.iii Modèle basé sur une approche orientée objet : la classe mère *Actor*

Du point de vue de la modélisation, nous avons développé le modèle de l'acteur sur la base de la programmation orientée objet, à l'instar des briques de modèles techniques. Ainsi le code associé à un

acteur est regroupé au sein d'une même classe ou des classes qui en héritent. Une classe mère *Actor*⁸², dont hérite l'ensemble des classes définissant les acteurs a donc été développée. Comme pour les unités énergétiques, la classe *Actor* est définie héritant de la classe *OptObject*, à laquelle peut être associée des contraintes, *Constraint*, et des objectifs, *Objective* (cf. Figure 58). Comme tout objet, la classe *Actor* possède deux attributs : *name* pour donner un nom à l'instance⁸³ et *description* pour pouvoir décrire l'objet si nécessaire.

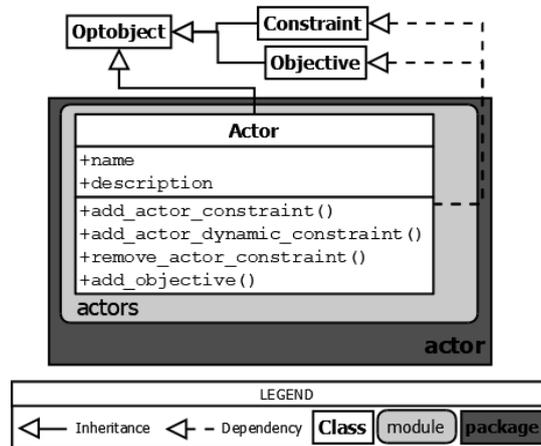


Figure 58 : Diagramme de classe pour la classe Actor | Source : Auteure

La classe *Actor* est définie comme une classe abstraite, c'est-à-dire non spécifique à un acteur en particulier. Ceci implique que nous n'avons pas proposé de contrainte ni d'objectif spécifique pour cette classe. En revanche, nous avons développé des méthodes génériques pour ajouter ou supprimer des contraintes et des objectifs. Pour les contraintes, les méthodes *add_actor_constraint* et *add_actor_dynamic_constraint* permettent d'ajouter des contraintes qui sont liées à l'acteur. Il faut alors fournir le nom de la contrainte et son expression. Ces contraintes sont basées sur les classes de contraintes spécifiques aux acteurs, *ActorConstraint* et *ActorDynamicConstraint*, comme préconisé dans la sous-partie III.3.i afin de pouvoir les différencier des contraintes de définition et des contraintes techniques. La méthode *remove_actor_constraints* permet de désactiver un ensemble de contraintes dont on fournit le nom. Pour les objectifs, la méthode *add_objective* permet d'ajouter un objectif en fournissant le nom et l'expression. A l'instar des objectifs modélisés pour les unités énergétiques, un poids peut être ajouté à l'objectif afin de pouvoir lui donner plus ou moins d'importance par rapport aux autres. Une représentation graphique pour le modèle de l'acteur est proposée sur la Figure 59. Contrairement aux objets techniques, la couleur choisie pour les acteurs n'a pas de signification particulière.

⁸² Le code est disponible ici : <https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/actor/actor.py>.

⁸³ Pour rappel, l'instance d'une classe correspond à l'objet créé dans le modèle à partir de la classe. Plusieurs instances peuvent être créées à partir d'une même classe.

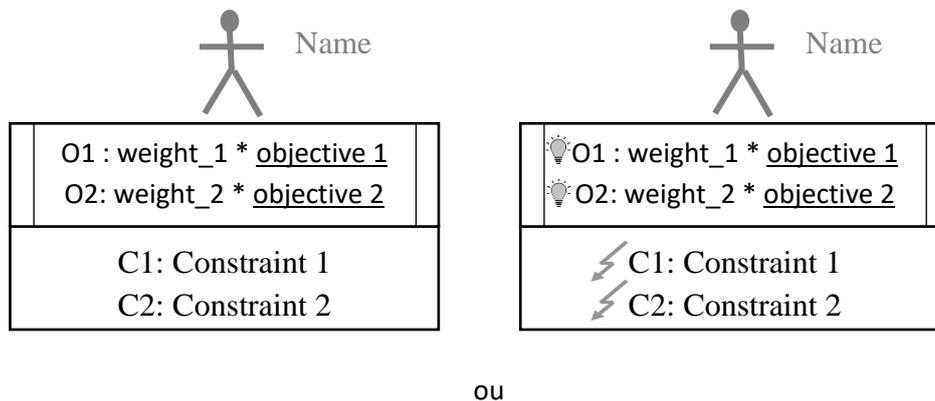


Figure 59 : Représentations graphiques pour le modèle d'acteur | Source : Auteure

IV.2.iv Modèle limité aux parties prenantes

Comme présenté dans le chapitre I (cf. I.3.iii.c), les SELBC impliquent de nombreux types d'acteurs. Modéliser l'ensemble des acteurs pourrait complexifier de manière trop importante le modèle réduisant alors l'intérêt de modéliser les acteurs. Choisisant de ne pas modéliser tous les acteurs et nous intéressant à l'influence des acteurs sur la forme du SELBC, **il nous semble opportun de ne proposer des modèles que pour les acteurs ayant une influence substantielle sur la forme du SELBC.** Dans la partie I.3.iii.c nous avons proposé une liste d'acteurs de ce type que nous avons définis comme les parties prenantes du projet.

IV.2.v Séparation en trois typologies de parties prenantes : régulateurs, opérateurs et développeurs

Cherchant à regrouper les parties prenantes en catégories, **nous avons mis en évidence trois catégories types : les régulateurs, les opérateurs et les développeurs** (cf. I.3.iii.c). Les premiers formulent les règles et les procédures alors que les deux autres doivent les respecter. Cette distinction peut être prise en compte dans l'outil et permettre une modélisation plus claire du SELBC.

Concernant les acteurs régulateurs, ils n'opèrent pas d'unité énergétique en particulier, mais influencent le système énergétique vis-à-vis de la régulation du réseau et/ou des ressources. Leurs décisions peuvent affecter l'ensemble des unités énergétiques. (Hinker et al. 2017) mettent aussi en évidence ce principe d'un acteur extérieur ajoutant des contraintes en parlant de « compulsion ». La régulation se fait via des actants tels que la loi, les décrets, etc. Bien que les acteurs régulateurs puissent avoir des objectifs, ce ne sont pas directement ces objectifs qui influent sur le projet, mais les lois et décrets qui en découlent. En effet, si l'État a pour objectif d'assurer la péréquation tarifaire, c'est bien via les lois sur la taxation de l'électricité identique sur l'ensemble du territoire qu'il y arrive. Dans le modèle proposé pour les régulateurs, seules les contraintes seront donc modélisées. Ces contraintes peuvent être appliquées à l'ensemble du système technique modélisé, les unités énergétiques subissant cette contrainte sont à choisir par le modélisateur. **Du point de vue de la**

modélisation nous avons modélisé la classe *RegulatorActor*⁸⁴, qui hérite de la classe *Actor*. Les acteurs régulateurs sont divisés en deux grandes catégories (cf. I.3.iii.c) : les autorités régulatrices locales (ex : collectivités territoriales) et les autorités régulatrices extérieures au projet (ex : État, Commission de Régulation de l'Énergie). D'un point de vue modélisation, deux classes héritent donc de la classe *RegulatorActor* : *LocalAuthority* et *StateAuthority* (cf. Figure 60).

Concernant les acteurs opérateurs, nous avons modélisé une classe *OperatorActor*⁸⁵, qui hérite de la classe *Actor*. La principale différence entre les deux types d'acteurs est que l'acteur opérateur ne peut influencer, vis-à-vis des contraintes et objectifs, que sur les unités dépendant de son périmètre de responsabilité, comme nous le verrons plus en détail dans la sous-partie suivante. En se basant sur la typologie d'acteurs réalisée dans la sous-partie I.3.iii et à titre d'illustration, nous avons développé les classes suivantes (cf. Figure 60) : *Consumer* (pour les consommateurs), *Producer* (pour les producteurs), *Prosumer* (pour les *prosumers*) et *Supplier* (pour les fournisseurs). Les classes *Consumer*, *Producer* et *Supplier* héritent de la classe *Actor*. Bénéficiant de la notion d'héritage disponible par la programmation orientée objet, la classe *Prosumer* hérite des classes *Consumer* et *Producer*. Cela implique que les contraintes et objectifs associés aux classes *Consumer* et *Producer* peuvent être utilisées par les acteurs modélisés avec la classe *Prosumer*, mais que l'inverse n'est pas vrai. Les classes sont séparées dans des modules différents pour une plus grande clarté.

Concernant le développeur du projet, la classe *ProjectDeveloper*⁸⁶ a été développée. Elle est issue de la classe *Actor* et n'a pas de spécificité particulière. Des objectifs et des contraintes qui sont propres aux acteurs porteurs de projet peuvent être associés.

IV.2.vi Prise en compte des nœuds socio-énergétiques des acteurs opérateurs via le domaine de responsabilité

La notion de nœud socio-énergétique, déjà présentée dans la sous-partie I.3.iii.a et utilisée dans la sous-partie I.3.iii.b, nous amène à penser le système technique comme un ensemble de sous-systèmes découpés selon la responsabilité des acteurs. Pour rappel, nous appuyant sur la définition proposée par (Debizet 2016), nous définissons un nœud socio-énergétique comme « un ensemble d'éléments, qui collecte, convertit et/ou distribue de l'énergie, construit ou opéré par un acteur décisionnel en interaction avec des actants ». L'aspect qui nous intéresse ici est le fait que les parties prenantes de type opérateur ou développeur ont un nœud socio-énergétique délimitant leur zone de responsabilité et d'influence. Il s'agit des unités énergétiques qu'elles opèrent (pour les parties prenantes

⁸⁴ Le code est disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/actor/regulator_actors/regulator_actors.py.

⁸⁵ Le code est disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/actor/operator_actors/operator_actors.py.

⁸⁶ Le code est disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/actor/project_developer_actors/developer_actors.py.

opératrices) ou construisent (pour le développeur). Pour les parties prenantes régulatrices, elles n'ont pas de nœud socio-énergétique associé, leurs contraintes peuvent donc s'appliquer à l'ensemble du système modélisé.

Du point de vue de la modélisation, nous proposons de prendre en compte la notion de nœud socio-énergétique, en limitant la zone de responsabilité associée aux opérateurs. Ainsi, les contraintes et objectifs des parties prenantes ne peuvent être appliqués qu'à l'espace de responsabilité de ces derniers. Pour cela, il est nécessaire de définir l'espace de responsabilité de l'acteur dans la modélisation. Ainsi, deux paramètres sont associés à l'acteur :

- *operated_unit_list* : pour indiquer les unités énergétiques faisant parties du domaine de responsabilité de la partie prenante,
- *operated_node_list* : pour indiquer les nœuds faisant parties du domaine de responsabilité de la partie prenante.

Quelques vérifications, qui nous semblaient nécessaires pour assurer un modèle cohérent, ont également été développées. Tout d'abord, les unités énergétiques doivent être du même type que celui de l'acteur. Par exemple, si l'acteur est de type *Consumer*, les unités de son domaine de responsabilité ne peuvent être que des unités de consommation de type *ConsumptionUnit* (ou des nœuds énergétiques). Pour cela, la méthode *_check_unit_type* a été développée dans la classe *OperatorActor*. Cette méthode vérifie lors de la création de la partie prenante (et plus précisément lors de la projection du modèle en une formulation linéaire cf. III.1.ii) que le type de l'unité énergétique du domaine de responsabilité est cohérent avec le rôle de l'acteur. Ensuite, les objectifs et les contraintes des parties prenantes ne peuvent être appliqués qu'aux unités du domaine de responsabilité. Pour cela, les méthodes *_check_operated_unit_list* et *_check_operated_node_list*, également ajoutée dans la classe *OperatorActor* a été développée. Il s'agit de vérifier, lorsqu'un objectif ou une contrainte est appliqué via un acteur de type opérateur, que l'unité énergétique (ou le nœud) appartient bien au domaine de responsabilité de l'acteur. Dans le cas contraire, une erreur explicitant le problème apparaît et le programme s'arrête sans être résolu. Si aucune unité n'est spécifiée lors de l'ajout d'un objectif ou d'une contrainte au modèle, l'objectif ou la contrainte est appliqué à l'ensemble des unités du domaine de responsabilité de l'acteur. Lorsque les deux vérifications sont faites, un attribut *operator* est ajouté aux unités énergétiques permettant de lier les unités énergétiques à la partie prenante. A l'instar des opérateurs, deux paramètres sont associés au développeur : *built_unit_list* et *built_node_list* et deux méthodes *_check_built_unit_list* et *_check_built_node_list* ont été développés au sein de la classe *ProjectDeveloper*.

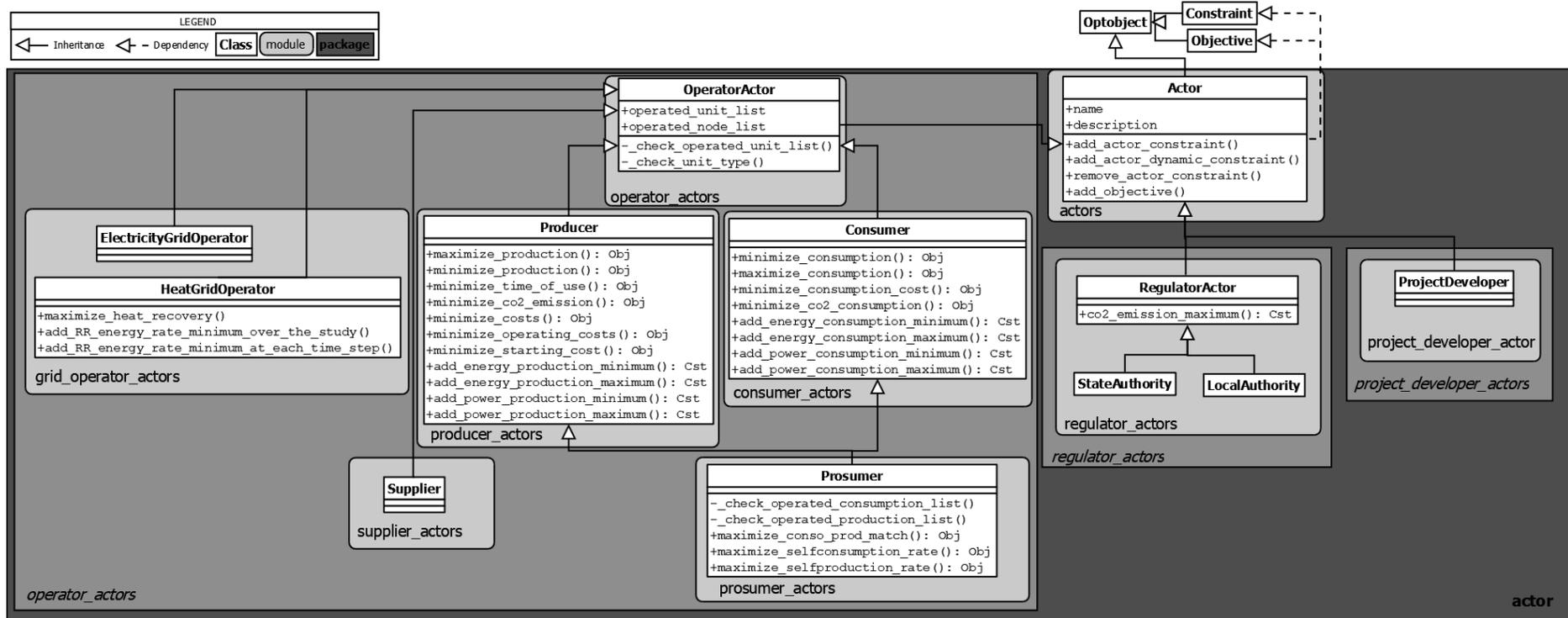


Figure 60 : Diagramme des classes pour les acteurs dans le métamodeleur OMEGAAlpes | Source : Auteure

Nous intéressants aux domaines de responsabilité des acteurs, nous avons mis en évidence deux sous-types d'acteurs pour les opérateurs : ceux restreints au SELBC et ceux qui sont à l'interface entre le projet local et le reste du SELBC, comprenant les autres réseaux et bâtiments. Cette distinction n'est actuellement pas prise en compte dans la modélisation, mais elle l'est dans la représentation graphique par un rectangle ouvert lorsque le domaine de responsabilité est plus large que le projet énergétique étudié (cf. Figure 61).

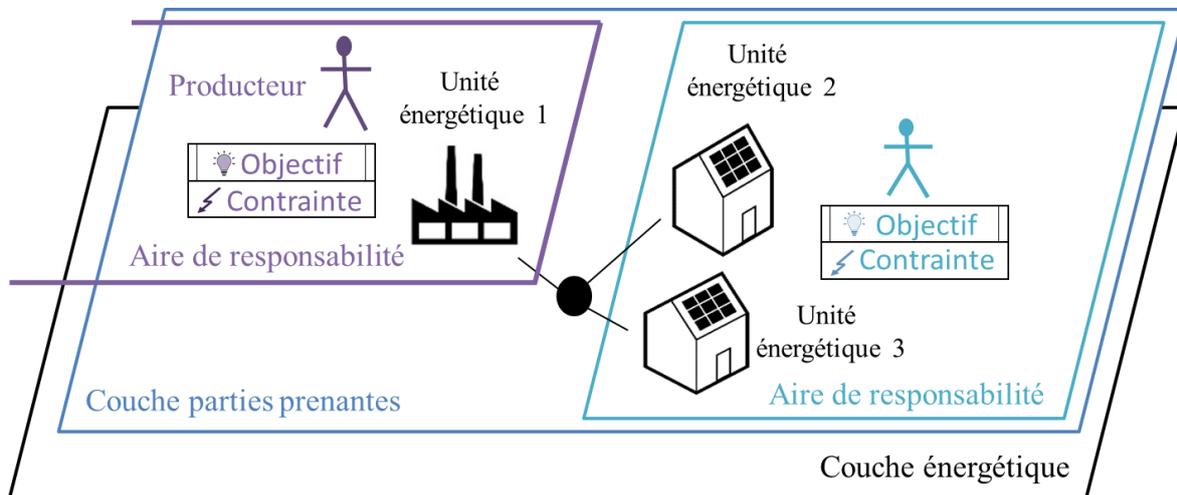


Figure 61 : Représentation de la modélisation multiacteur intégrant les acteurs opérateurs | Source : Auteure, à partir de (Morriet, Debizet, et Wurtz 2019)

IV.2.vii Modéliser les parties prenantes associées au SELBC avec OMEGAlpes

Le modèle de l'assemblage associé aux parties prenantes se fait dans la continuité du modèle de l'assemblage associé à la partie technique du SELBC, présenté dans l'article (Pajot et al. 2019). La temporalité associée au cas d'étude est donc à définir dans un premier temps. Ensuite, le modèle de base, les unités énergétiques et les nœuds sont également à définir. Le modèle des parties prenantes vient ensuite⁸⁷. Il s'agit d'instancier la partie prenante *ad hoc* à partir d'une classe présente dans la bibliothèque de modèles et d'indiquer son nom (*name*) et les unités de son domaine de responsabilité (*operated_unit_list*, *operated_consumption_unit_list* ou *operated_production_unit_list*) comme présenté dans le code ci-dessous pour un consommateur, un producteur et un fournisseur :

- `consumer = Consumer(name='consumer',
operated_unit_list=[dwelling_consumption_1,
dwelling_consumption_2])`
- `producer = Producer(name='producer',
operated_unit_list=[local_pv_production])`

⁸⁷ Les extraits de code proviennent du cas d'étude « `article_2019_BS_multi_actor_modelling.ipynb` » disponible sous forme de notebook à https://mybinder.org/v2/git/https%3A%2F%2Fgricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr%2Fomegalpes%2Fomegalpes_examples/master.

- `supplier = Supplier(name='supplier_conso',
operated_consumption_unit_list=[supplier_consumption],
operated_production_unit_list=[supplier_production])`

Ensuite, des objectifs et des contraintes associés à l'acteur peuvent être ajoutés au modèle, qu'ils soient prédéfinis ou non, comme présenté dans le code ci-dessous :

```
# Actor constraints
• producer.add_actor_constraint(cst_name='max_pv',
                               exp='local_pv_production_nb_unit<=40')

# Actor objectives
• supplier.minimize_consumption([supplier_consumption], weight=1)
• consumer.minimize_consumption(weight=1)
```

La contrainte modélisée n'existe pas dans la bibliothèque de modèles. Il est donc nécessaire d'utiliser la méthode `add_actor_constraint` pour l'ajouter. Le premier objectif modélisé s'applique sur l'unité `supplier_consumption`, dont il s'agit de minimiser la consommation. Le second objectif n'explicite pas d'unité : l'objectif s'applique donc à l'ensemble des unités opérées par le consommateur, et donc `dwelling_consumption_1` et `dwelling_consumption_2`. Le poids des objectifs est le même : il vaut 1. La valeur 1 étant la valeur par défaut définie dans l'outil, le modélisateur n'est donc pas obligé de l'indiquer.

Ainsi, la bibliothèque de modèles OMEGAAlpes propose un modèle multiacteur et permet de modéliser des assemblages composés d'objets techniques et d'acteurs (cf. I.2.iv) pour la conception des SELBC.

IV.3 Limites du modèle d'acteur proposé

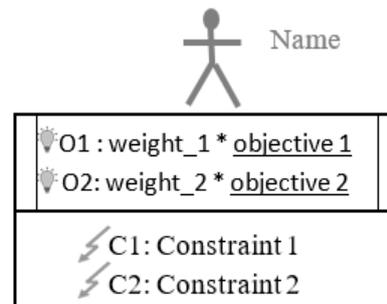
La partie précédente propose un modèle d'acteur pour compléter les modèles techniques proposés dans les métamodeleurs d'optimisation. Ce modèle d'acteur a bien sûr des limites sur lesquelles nous reviendrons dans cette partie. Tout d'abord le modèle proposé est très partiel (IV.3.i), ensuite il ne propose de modéliser que les parties prenantes, et non l'ensemble des acteurs (IV.3.ii), enfin, modéliser les acteurs revient à complexifier l'étape de modélisation du problème (IV.3.iii).

IV.3.i Un modèle très partiel des acteurs, considéré (positivement) comme « parcimonieux » et « effectif »

Comme tout modèle, celui que nous proposons est partiel. L'incomplétude de la modélisation est imparable au vu de la complexité d'un acteur. C'est pourquoi, à l'instar de la démarche présentée dans la sous-partie II.5.v, nous n'avons pas cherché à proposer un modèle complexe, mais au contraire à le simplifier, dans l'idée de le rendre plus effectif vis-à-vis de la modélisation et la résolution du problème. Ainsi, nous n'avons pas cherché à modéliser les acteurs, mais uniquement les raisons influentes de ces derniers. De plus, parmi les raisons influentes nous proposons de ne modéliser que les objectifs et les contraintes. Ces choix sont liés au fort impact des décisions sur la forme du SELBC, à la facilité de modélisation dans un métamodeleur d'optimisation, ainsi qu'à la facilité de compréhension du modèle. Cette modélisation implique cependant que toutes les scènes de négociations ne peuvent

donc pas être identifiées via l'outil. Et que les parties prenantes peuvent ne pas se retrouver dans la représentation très schématique que nous proposons.

Par ailleurs, pour faciliter la présentation de notre modèle, nous indiquons avoir développé un modèle d'acteurs. Or ce modèle est loin de pouvoir représenter un acteur. La Figure 62 intitulée « Ceci n'est pas un acteur » cherche à rappeler qu'à l'image du tableau de (Magritte 1928), nous ne modélisons pas les acteurs, mais uniquement un modèle partiel et très simplifié.



Ceci n'est pas un acteur

Figure 62 : « Ceci n'est pas un acteur » | Source : Auteure, inspirée de (Magritte 1928)

IV.3.ii Une sélection des acteurs modélisés

Il est nécessaire d'être vigilant dans le choix des acteurs à modéliser, car oublier une partie prenante dans la modélisation revient à ne pas prendre en compte sa vision du projet. Ceci implique que le SELBC proposé ne correspondra sûrement pas à cette partie prenante, qui peut donc potentiellement chercher à faire arrêter le projet. (Hinker et al. 2017) expliquent que les parties prenantes retenues, et donc modélisées, sont souvent sélectionnées par les modélisateurs en fonction de leur vision du projet et de leur discipline scientifique. C'est pourquoi nous avons cherché à identifier, en phase amont de la modélisation d'un SELBC, les parties prenantes de manière générique (cf. I.3.iii.c), et à les proposer sous forme de pré-modèles dans le métamodeleur OMEGAAlpes.

Par ailleurs, le choix de ne pas prendre en compte l'ensemble des acteurs, mais uniquement les parties prenantes du projet qui ont, par définition, une influence substantielle sur la forme du SELBC, est donc une prise de risque. De plus, il est tout à fait possible que des acteurs que nous n'avons pas identifiés aient un impact sur la forme du SELBC. D'autant que les SELBC étant émergents, il est possible que de nouveaux acteurs se positionnent sur ce type de projet. Ces choix seront donc à valider ou à réviser en appliquant le modèle d'acteurs proposé sur des projets de SELBC. La bibliothèque de modèles étant open source, il est possible d'ajouter au besoin des modèles d'acteurs que nous n'aurions pas pré-modélisés préalablement.

La démarche la plus appropriée serait d'identifier les acteurs pour chaque projet. Une méthodologie, détaillée dans le chapitre suivant, présente une manière de le faire, bien que cela puisse être chronophage.

IV.3.iii Une complexification du processus de modélisation et du modèle

Modéliser les contraintes et les objectifs des acteurs amène à alourdir le processus de modélisation. En effet, il est alors nécessaire, en plus de modéliser le système énergétique, de modéliser les acteurs puis leurs objectifs et contraintes qui sont à appliquer aux unités énergétiques. Modéliser les contraintes et les objectifs des acteurs amène également à complexifier la formulation du modèle, notamment avec le domaine de responsabilité. En revanche, nous faisons l'hypothèse que ce modèle apporte un intérêt dans la phase de formulation du problème, en amenant les parties prenantes à s'interroger sur leurs contraintes et leurs objectifs vis-à-vis du SELBC, et dans la phase d'analyse, lorsque la négociation est nécessaire (cf. Figure 57).

Conclusion du chapitre IV

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons réalisé un état de l'art sur les modèles multiacteurs proposés dans les outils d'aide à la conception. Parmi les métamodeleurs identifiés dans la sous-partie II.1.v, la prise en compte du caractère multiacteur des systèmes énergétiques n'est envisagée que pour deux métamodeleurs et les codes associés ne sont actuellement pas accessibles. C'est pourquoi nous avons réalisé une recherche par mots clefs mettant en évidence plusieurs approches de prise en compte des acteurs dans les projets énergétiques : la proposition de modèles multiacteurs, l'analyse comparative d'études selon plusieurs acteurs, l'intégration d'acteurs dans le processus de modélisation, ou encore la discussion avec plusieurs experts sur le processus de modélisation ou le modèle. Concernant les modèles multiacteurs, nous avons mis en évidence deux catégories de modèles : la modélisation d'actions et la modélisation d'objectifs. Au vu des conditions d'utilisation de l'outil, il nous semble que la modélisation d'action est trop détaillée et que la modélisation d'objectifs est insuffisante. Nous proposons donc un autre modèle d'acteur : un modèle parcimonieux et effectif ne modélisant que les objectifs et les contraintes des parties prenantes. Les contraintes et les objectifs visent à représenter les « raisons influentes » portées par les parties prenantes et modifient la forme du SELBC. Le modèle est basé à la fois sur une approche orientée objet, facilitant une modélisation compréhensible, ainsi qu'une distinction entre le modèle associé à la technique et le modèle associé aux acteurs, et sur la théorie des nœuds socio-énergétiques menant à la prise en compte d'une zone de responsabilité pour les acteurs dans le modèle. Enfin, le chapitre revient sur trois limites assumées de ce modèle : un modèle partiel des acteurs, une sélection des acteurs modélisés et une complexification de la modélisation.

Ce chapitre s'arrête à la description de la structure du modèle des acteurs. Les contraintes et les objectifs des acteurs ne sont pas explicités pour chaque acteur. C'est pourquoi nous proposons dans le chapitre suivant une méthodologie pour identifier les raisons influentes et notamment les contraintes et les objectifs.

CHAPITRE V

Analyse qualitative pour modéliser les parties prenantes via leurs contraintes et objectifs

V.1	METHODOLOGIES DE RECHERCHE ET D'ANALYSES EN SCIENCES SOCIALES : NOS CHOIX VIS-A-VIS DE NOTRE QUESTION DE RECHERCHE.....	140
	V.1.i	Objet d'étude, question de recherche et hypothèses..... 140
	V.1.ii	Techniques de recherche : enquêtes, observations et littérature grise 140
	V.1.iii	Mener (ou non) une enquête qualitative..... 141
	V.1.iv	Analyse : recours à un logiciel d'assistance au dépouillement de données qualitatives 141
V.2	METHODOLOGIE D'ANALYSE POUR L'IDENTIFICATION DES RAISONS INFLUENTES DES PARTIES PRENANTES.....	142
	V.2.i	Choix des terrains : deux types de SELBC et quatre terrains retenus..... 143
	V.2.ii	Les monographies comme matériaux d'analyse..... 150
	V.2.iii	Analyse hypothético-déductive et définition des nœuds 150
	V.2.iv	Synthèse de la méthodologie d'analyse pour l'identification des raisons influentes des parties prenantes..... 157
V.3	EXEMPLES DE RESULTATS DE L'ANALYSE ET PROPOSITION DE MODELISATION : APPLICATION AU CAS DE LA VALORISATION DE CHALEUR FATALE A DUNKERQUE	159
	V.3.i	Acteur développeur..... 161
	V.3.ii	Acteurs opérateurs 163
	V.3.iii	Acteurs régulateurs 171
	V.3.iv	Acteurs indirectement engagés dans la conception et dans le fonctionnement SELBC..... 175
	V.3.v	Éléments naturels 176
V.4	LIMITES DE L'ANALYSE ET DE LA MODELISATION ASSOCIEE	176
	V.4.i	Retour sur la méthode d'analyse 176
	V.4.ii	Retour sur la modélisation issue de l'analyse 178
	CONCLUSION DU CHAPITRE V	179

Chapitre V. Analyse qualitative pour modéliser les parties prenantes via leurs contraintes et objectifs

Ce chapitre se place dans la continuité du chapitre précédent. Il s'agit également de proposer une réponse au 3^{ème} paradoxe qui met en évidence que bien que la conception des SELBC devient multiparties prenantes, les choix et décisions des parties prenantes ne sont pas pris en compte de manière explicite dans les modèles (cf. I.5.iii). Le chapitre précédent introduit la structure d'un modèle multiacteur que nous proposons pour accompagner les parties prenantes dans la conception de leur SELBC. Les acteurs pouvant être très différents, une modélisation détaillée des acteurs est nécessaire pour alimenter une bibliothèque de modèles adaptée à la diversité des SELBC. C'est pourquoi, comme nous le présentons dans ce chapitre, nous avons mis en place une méthodologie permettant de réaliser une analyse fine des parties prenantes de SELBC, ainsi que leurs objectifs et contraintes. Pour réaliser ce travail, nous nous sommes appuyée sur des méthodologies d'analyses développées et utilisées en sciences sociales, et plus précisément sur les enquêtes qualitatives. Nous verrons dans la pratique que l'ensemble des contraintes et objectifs identifiés n'ont pas vocation à être modélisés de manière quantitative.

Une première partie présente succinctement les méthodologies d'enquêtes et d'analyses largement utilisées dans les sciences sociales afin de replacer notre démarche parmi ces travaux (V.1). Une deuxième partie expose la méthodologie que nous avons définie pour l'identification des acteurs, de leurs objectifs et de leurs contraintes (V.2). Une troisième partie présente les résultats issus de l'analyse⁸⁸ (V.3). Enfin, comme pour les chapitres précédents, une dernière partie revient sur les limites des travaux présentés (V.4).

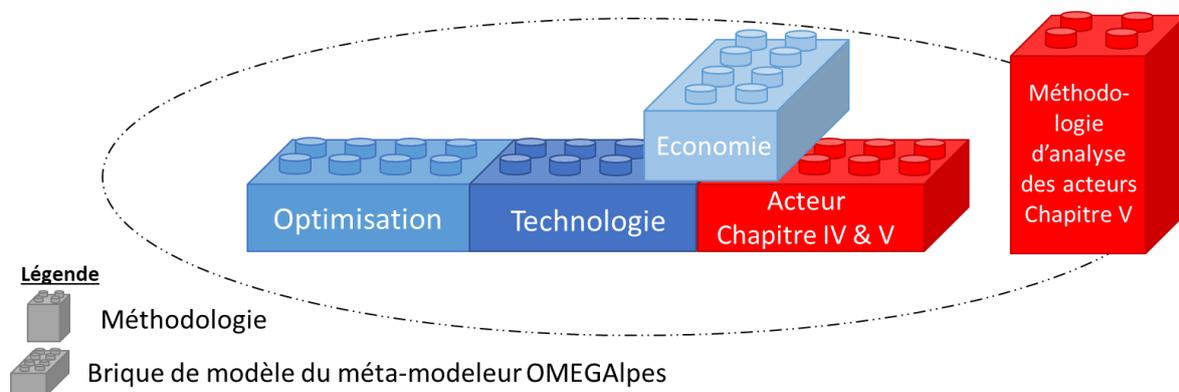


Figure 63 : Apport du chapitre IV : un modèle d'acteurs explicite et une méthodologie d'analyse associée | Source : Auteure

⁸⁸ Le travail réalisé sous Nvivo pour les monographies est disponible sur <https://cloud.univ-grenoble-alpes.fr/index.php/s/fYMJD2dLzGG7t3r>. Une version d'essai de 30 jours du logiciel Nvivo permet d'accéder au travail qui est présenté dans ce chapitre. Les requêtes utilisées sont disponibles dans l'onglet situé en bas à gauche : Rechercher / Résultats de Requête.

V.1 Méthodologies de recherche et d'analyses en sciences sociales : nos choix vis-à-vis de notre question de recherche

Cette première partie présente succinctement les méthodologies d'enquêtes et d'analyses largement utilisées dans les sciences sociales afin de replacer notre démarche parmi ces travaux. Nous commençons, dans une première sous-partie (V.1.i), par repréciser notre objet d'étude ainsi que la question de recherche et les hypothèses sous-jacentes, associées à ce chapitre. Ensuite, nous présentons des techniques de recherche utilisées en sciences sociales et précisons notre besoin (V.1.ii) avec un zoom sur les enquêtes qualitatives (V.1.iii) et les logiciels d'assistance au dépouillement (V.1.iv).

V.1.i Objet d'étude, question de recherche et hypothèses

Cette thèse vise à accompagner la conception des SELBC et propose pour cela de modéliser les SELBC comme des assemblages composés de systèmes techniques et d'acteurs. Pour compléter la modélisation technique des systèmes énergétiques, une modélisation multiacteur, pour les métamodélisateurs d'optimisation, a alors été développée. Elle est présentée dans le chapitre précédent. Pour préciser, il ne s'agit pas de modéliser les acteurs du SELBC mais les raisons influentes qu'ils portent et qui modifient la forme du SELBC (cf. IV.2.ii). La question de recherche associée à ce chapitre est donc la suivante : **quelles sont les raisons influentes portées par les parties prenantes ?** Cherchant à répondre à cette question de recherche, nous faisons **l'hypothèse qu'il existe et qu'il est possible d'identifier des raisons influentes et de les associer à des parties prenantes types.**

Cette hypothèse principale nous amène à faire plusieurs sous-hypothèses :

- la première est qu'il est possible d'identifier les raisons influentes via un corpus de texte décrivant les SELBC,
- la deuxième est qu'il existe des raisons influentes de type objectif et contrainte, et cela dans l'idée que ce travail puisse aboutir à la production d'une bibliothèque de modèles comme présenté dans le chapitre précédent,
- la troisième est que les raisons influentes sont portées différemment par les acteurs : elles peuvent être communes ou spécifiques.

V.1.ii Techniques de recherche : enquêtes, observations et littérature grise

Dans l'idée d'identifier des éléments de réponse valides scientifiquement à diverses questions de recherche, des méthodes ont été développées (Gauthier 2009). Deux grandes catégories de méthodes peuvent être mises en évidence : les méthodes qualitatives « adaptées à une recherche approfondie » et les méthodes quantitatives « adaptées à une recherche systématique, sur un grand nombre de données » (Livian 2015). Cherchant à identifier et non à quantifier, les méthodes qualitatives nous semblent plus appropriées à nos besoins.

Au sein de ces catégories, plusieurs techniques de recherche peuvent être envisagées : l'observation, les techniques de recherche documentaire, les techniques d'entretien ou d'enquête ou encore l'expérimentation (Ouhajjou, s. d.). La recherche mobilise en général plusieurs techniques dans le but de répondre à la problématique posée.

Nous interrogeant sur les raisons influentes des acteurs dans les prises de décision, il nous semble nécessaire de permettre aux parties prenantes de s'exprimer sur le processus de conception détaillant leur compréhension et analyse du projet. C'est pourquoi les techniques d'enquête nous semblent essentielles dans le cadre de notre travail. Par ailleurs, afin de pouvoir comparer le discours des acteurs avec d'autres points de vue sur le projet, il est nécessaire de prévoir des phases d'observations et de lecture de « littérature grise », qui est de la documentation sur le projet, réalisée par des acteurs dans le cadre de leur fonction.

En revanche l'expérimentation nous semble assez peu appropriée à cette étape, mais pourrait tout à fait l'être par la suite dans l'idée d'expérimenter la modélisation proposée dans le cadre de la conception d'un SELBC.

V.1.iii Mener (ou non) une enquête qualitative

Concernant la technique d'enquête, (Bréchon (dir.) 2011) précise que « faire une enquête consiste à interroger un certain nombre de personnes pour découvrir ce qu'ils ont fait antérieurement, comment ils se comportent, ce qu'ils croient et ce qui les motive. C'est trouver des explications à leurs comportements et pensées ». Ces entretiens peuvent être directifs, semi-directifs ou non directifs, selon l'objectif du chercheur, ce qui amène l'interviewé à répondre à des questions précises, ou plus larges selon la méthodologie choisie. L'entretien semi-directif est souvent utilisé car il permet à la fois de mieux cerner le sujet sur lequel le chercheur souhaite que l'interviewé s'exprime – à l'instar de l'entretien directif - et à la fois de réorienter la discussion sur certains points qui n'avaient pas été envisagés par l'intervieweur, mais qui pourraient être intéressants pour l'enquête – à l'instar de l'entretien non-directif. Les entretiens sont souvent répartis en deux phases : une première permettant l'identification des terrains et des acteurs pertinents (on parle d'entretiens exploratoires) ; une deuxième permettant de réaliser des entretiens plus approfondis avec les différentes catégories d'acteurs en lien avec l'objet d'étude ou le terrain. Les entretiens sont ensuite généralement retranscrits.

Ce travail d'enquête est souvent long et l'objet de toute une thèse. Comme nous le présentons par la suite (cf. V.2.i.a), nous avons fait le choix de ne pas réaliser ce travail d'enquête par nous-même, mais de travailler à partir de matériaux déjà collectés, voire analysés dans la majorité des cas, par des chercheurs en sciences sociales. Ainsi, nous avons travaillé à partir de monographies réalisées sur le même objet d'étude que nous : des SELBC.

Nous avons aussi eu l'occasion de contribuer à l'élaboration d'une grille d'analyse d'entretiens sur l'autoconsommation collective, qui a ensuite servi pour mener des entretiens. Nous avons également participé à trois entretiens pour observer l'application de la grille et les ajustements que fait un enquêteur.

V.1.iv Analyse : recours à un logiciel d'assistance au dépouillement de données qualitatives

Une analyse des retranscriptions est ensuite réalisée à l'aide, ou non, d'un logiciel. Ce paragraphe présente succinctement les outils d'analyse, puis la méthode d'analyse que nous avons utilisée, et qui est reprise et détaillée dans la partie suivante.

Plusieurs logiciels ont aujourd'hui été développés pour l'analyse de données qualitatives : les logiciels d'analyse textuelle (Spad-T, Lexico...) proposant une analyse plutôt quantitative des données, et les logiciels d'assistance au dépouillement de données qualitatives (Nvivo, Sphinx Quali...), proposant une aide à l'analyse selon des thèmes choisis par l'analyste... Ces derniers sont nommés CAQDAS pour Computer Aided Qualitative Data Analysis Systems. Selon (Abrial et Louvel 2011, 78), les logiciels d'analyse textuelle se basent sur « la statistique, la lexicométrie et la linguistique ». Quant aux logiciels CAQDAS, il s'agit plutôt d'aider à « repérer les contextes d'énonciation, les thématiques, le rôle des acteurs, les stratégies, les enjeux... ». **Cherchant à identifier des acteurs et des raisons influentes non prédéfinis (en dehors des termes « objectif » et « contrainte »), les outils de type CAQDAS semblent plus appropriés.** Le laboratoire de sciences sociales Pacte mettant à disposition des doctorants des licences pour Nvivo, **nous avons choisi de réaliser l'analyse à partie de l'outil d'analyse qualitative Nvivo.**

Utilisant l'outil Nvivo, le principe consiste à repérer dans l'entretien les réponses correspondant aux thèmes de la problématique : on parlera alors de « codage » ou de « nœud ». Pour nos travaux, des nœuds génériques tels que « acteurs » ou « raisons influentes » sont à envisager. Ces nœuds génériques sont alors à redécouper en nœuds plus spécifiques. Ainsi, du nœud « raisons influentes » peuvent découler les nœuds « objectifs » et « contraintes ». L'outil permet alors, via des recherches présentant les résultats sous forme de matrices, d'identifier des citations, ou verbatims s'il s'agit d'extraits d'entretiens, associées à plusieurs nœuds. Ainsi, nous pouvons mettre en évidence des contraintes et des objectifs associés à un type d'acteur. La redondance des contraintes et objectifs identifiés à partir des différentes monographies assure la robustesse du corpus de base et des raisons influentes identifiées.

Plusieurs types de codages peuvent être envisagés : thématiques, transversaux, contextuels/émotionnels ou encore séquentiels. Les codages transversaux sont définis comme n'ayant pas de lien *a priori* avec la question de recherche. Les codages contextuels/émotionnels ont pour objectif de permettre de mieux cerner les conditions de l'entretien. Les codages séquentiels ont pour objectif de permettre de distinguer plusieurs séquences dans les sources. Nous limitant uniquement à notre question de recherche, dans le cadre de notre travail d'analyse, nous avons réalisé un codage thématique (cf. V.2.iii).

Il est également possible de distinguer les extraits selon l'acteur qui parle. Cela permet de différencier les affirmations portées par un type d'acteurs, ou encore par le chercheur. Le code est alors associé à un « cas » auquel peut être associé des informations sur le métier de l'interviewé, son âge, etc. selon les besoins de l'étude. Nous n'avons pas exploité cette possibilité dans le cadre de nos analyses, bien que cela puisse être intéressant à réaliser par la suite. En effet, une comparaison des acteurs citant les raisons influentes pourrait faire office de validation des raisons influentes identifiées, si celles-ci sont indiquées par plusieurs acteurs.

V.2 Méthodologie d'analyse pour l'identification des raisons influentes des parties prenantes

Visant à identifier les raisons influentes, portées par les parties prenantes du SELBC, nous avons défini une méthodologie d'analyse que nous présentons dans cette partie. **Une particularité à noter, par rapport à des travaux plus classiques basés sur des enquêtes, est que nous avons fait le choix de ne**

pas mener de nouvelles enquêtes, mais de travailler à partir d'enquêtes et d'analyses déjà menées par des chercheurs en urbanisme en lien avec notre objet d'étude : les SELBC.

La première sous-partie présente les types de terrains que nous avons identifiés pour réaliser notre analyse (V.2.i). La seconde sous-partie présente les matériaux collectés sur les terrains analysés (V.2.ii). La troisième sous-partie présente en détail la grille de codage utilisée pour l'analyse via l'outil Nvivo (V.2.iii). La dernière sous-partie résume la méthodologie d'analyse proposée pour notre travail (V.2.iv).

V.2.i Choix des terrains : deux types de SELBC et quatre terrains retenus

Les SELBC peuvent prendre des formes très différentes. Dans le cadre de ce travail d'analyse, nous avons choisi de restreindre notre travail à deux types de SELBC basés sur deux vecteurs énergétiques différents. Pour le premier, il s'agit d'électricité produite à partir de panneaux photovoltaïques mutualisés. Pour le second type, il s'agit de chaleur fatale issue d'activités fortement consommatrices d'électricité.

Ce choix a été fait pour plusieurs raisons. Concernant l'électricité produite à partir de panneaux photovoltaïques mutualisés, ce SELBC est intéressant à étudier car son développement peut s'inscrire dans le cadre d'une loi récente datant de 2017 et permettant des échanges d'électricité directs entre producteurs et consommateurs locaux en passant par le réseau de distribution : la loi sur l'autoconsommation collective⁸⁹. Concernant la chaleur fatale issue d'activités fortement consommatrices d'électricité, ce SELBC est intéressant car de nombreux gisements ne sont toujours pas exploités (ADEME 2017). Les vecteurs énergétiques étant différents, il pourrait être intéressant de vérifier si les résultats sont plutôt similaires et peuvent être généralisés aux SELBC ou s'ils sont trop différents et doivent être utilisés de manière *ad hoc* en fonction du vecteur énergétique visé.

Par ailleurs, les chercheurs du projet Eco-SESA⁹⁰, au sein duquel nous réalisons ce travail : G. Debizet, T. Fonteneau, S. Laroche, M. Pappalardo, I. Ramirez Cobo, T. Reverdy, N. Tixier, S. Tribout et M. Yalçın-Riollet, ont enquêté sur des terrains mobilisant ces deux types de SELBC, ce qui a facilité nos échanges pour mener à bien ce travail. Plusieurs projets d'autoconsommation collective d'électricité, ainsi que le projet de récupération de chaleur du laboratoire de champs magnétique intense (LNCMI) pour réinjection dans le réseau de chaleur à Grenoble ont en effet été étudiés. La différence de temporalité

⁸⁹ Loi n° 2017-227 du 24 février 2017 ratifiant les ordonnances n° 2016-1019 du 27 juillet 2016 relative à l'autoconsommation d'électricité et n° 2016-1059 du 3 août 2016 relative à la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables et visant à adapter certaines dispositions relatives aux réseaux d'électricité et de gaz et aux énergies renouvelables - Article 9.

⁹⁰ Page « Interactions modeling between buildings and with grid in a district », *Eco-SESA*, consultée en février 2020, <https://ecosea.univ-grenoble-alpes.fr/research-fronts/interactions-modeling-between-buildings-and-with-grids-in-a-district/>.

entre l'avancement de leur recherche sur les terrains et ce travail de thèse a fait que nous nous sommes tournée vers d'autres travaux.

Enfin et surtout, des thèses en urbanisme étudiant ces deux types de SELBC ont pu être identifiées. Pour le vecteur électrique il s'agit de la thèse de (Aubert 2020), intitulée « "Communautés énergétiques" et fabrique urbaine ordinaire - Analyses croisées Allemagne, France, Royaume-Uni », qui s'intéresse aux projets d'autoconsommation collective d'électricité sur deux terrains français :

- **le projet « SmartMagne » à Marmagne (cf. Annexe E),**
- **le projet au sein de l'habitat participatif des Colibres à Forcalquier (cf. Annexe F).**

Pour le vecteur chaleur il s'agit de la thèse de (Hampikian 2017), intitulée « De la distribution aux synergies ? : Circulations locales d'énergie et transformations des processus de mise en réseau de la ville », qui s'attache à étudier la valorisation de chaleur fatale issue d'unités fortement consommatrices d'électricité pour réinjection dans un réseau de chaleur sur deux terrains :

- **la récupération de chaleur industrielle à Dunkerque (cf. V.2.i.c),**
- **la récupération de chaleur issue d'un data center au Val d'Europe (cf. Annexe G).**

L'intérêt d'étudier les deux cas d'étude sur l'autoconsommation collective est qu'ils sont portés par des acteurs différents : un tandem acteur public – acteur privé dans le premier cas et un habitat participatif dans le second cas. L'intérêt d'étudier les deux cas d'étude sur la récupération de chaleur fatale est que l'activité fortement consommatrice d'électricité n'est pas du même type : industrielle dans le premier cas et due à un data center dans le second cas. La gestion de la production de chaleur est donc très différente. Par ailleurs, (Hampikian 2017) met en évidence que ce type de SELBC crée des synergies entre les acteurs, contrairement à une production d'énergie plus classique.

Les deux types de terrain sont présentés plus en détail dans les deux sections suivantes (V.2.i.a et V.2.i.b). Bien que nous ayons appliqué notre méthodologie sur les quatre terrains, issus des deux thèses mentionnées ci-dessus, nous avons choisi de présenter notre méthodologie, dans ce chapitre, sur un seul terrain pour des raisons de lisibilité. Il s'agit du terrain sur la récupération de chaleur industrielle à Dunkerque, que nous présentons donc dans la section V.2.i.c. Les autres terrains, ainsi que les résultats issus de leur analyse, sont présentés en annexes (Annexe E, Annexe F et Annexe G).

V.2.i.a SELBC basé sur de l'électricité produite à partir de panneaux photovoltaïques mutualisés dans le cadre de l'autoconsommation collective

Le premier type de SELBC sur lequel nous avons travaillé est basé sur de l'électricité produite à partir de panneaux photovoltaïques mutualisés dans le cadre de l'autoconsommation collective. **Dans le**

cadre du projet de recherche Eco-SESA, nous avons participé à la réalisation d'une vidéo explicative sur l'autoconsommation collective⁹¹.

Avant 2017 la loi française ne permettait pas d'échanger de l'électricité produite localement entre plusieurs consommateurs en passant par le réseau public de distribution, en dehors du statut de fournisseur. **Une ordonnance⁹², promulguée en juillet 2016, ratifiée par une loi⁹³, promulguée en février 2017, suivi d'un décret⁹⁴, promulgué en avril 2017, rendent légalement possible l'autoconsommation collective électrique, permettant ainsi la fourniture d'électricité entre un ou plusieurs producteurs et un ou plusieurs consommateurs, sous certaines conditions, en échangeant l'énergie via le réseau public.**

La première condition est la suivante : « les producteurs et [les] consommateurs finals [doivent être] liés entre eux au sein d'une personne morale ». La personne morale organisatrice (PMO) a pour mission d'indiquer au gestionnaire du réseau la clef de répartition de la production partagée entre les différents bénéficiaires au pas de mesure de 30 minutes. Il est à noter que l'électricité produite étant consommée au plus proche, les échanges dans le cadre de l'autoconsommation collective ne sont donc pas « physiques » mais « calculés » : il s'agit d'un équilibre en termes de flux global d'énergie réalisé par pas de 30 minutes. Cette clef de répartition est essentielle pour la facturation, que ce soit pour la facturation du fournisseur, dont sera déduite l'énergie produite localement, ou pour la collecte des taxes associées à la production d'électricité locale. En effet, les flux transitant par le réseau public font l'objet d'une taxe d'utilisation de ce réseau appelée TURPE. Une clef de répartition est proposée par défaut par le gestionnaire réseau, mais d'autres clefs de répartition peuvent être envisagées.

La seconde condition est l'espace géographique considéré pour l'autoconsommation collective. Au travers de l'article L315-2 du code de l'énergie, on peut suivre l'évolution de cette condition entre

⁹¹ Page « Vidéo sur l'autoconsommation collective d'électricité », *Eco-SESA*, consultée en août 2020, <https://ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr/eco-sesa-program/news/video-sur-l-autoconsommation-collective-d-electricite-810496.htm?RH=248563962425208>.

⁹² *Ordonnance n° 2016-1019 du 27 juillet 2016 relative à l'autoconsommation d'électricité.*

⁹³ *Loi n° 2017-227 du 24 février 2017 ratifiant les ordonnances n° 2016-1019 du 27 juillet 2016 relative à l'autoconsommation d'électricité et n° 2016-1059 du 3 août 2016 relative à la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables et visant à adapter certaines dispositions relatives aux réseaux d'électricité et de gaz et aux énergies renouvelables - Article 9.*

⁹⁴ *MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER, CHARGÉ DES RELATIONS INTERNATIONALES SUR LE CLIMAT, Décret n° 2017-676 du 28 avril 2017 relatif à l'autoconsommation d'électricité et modifiant les articles D. 314-15 et D. 314-23 à D. 314-25 du code de l'énergie, Journal officiel, n°0102, 30 avril 2017.*

juillet 2016 et novembre 2019. Il y est indiqué que « les points de soutirage et d'injection » doivent être :

- en juillet 2016, « situés sur une même antenne basse tension du réseau public de distribution » (cf. Figure 64).
- en février 2017 : « situés en aval d'un même poste public de transformation d'électricité de moyenne en basse tension » (cf. Figure 65).
- en mai 2019 : « situés sur le réseau basse tension et respectent les critères, notamment de proximité géographique, fixés par arrêté du ministre chargé de l'énergie, après avis de la Commission de régulation de l'énergie » (cf. Figure 66).
- en novembre 2019 : « situés dans le même bâtiment, y compris des immeubles résidentiels ». Un qualificatif « étendue » est rajouté pour les opérations « dont les points de soutirage et d'injection sont situés sur le réseau basse tension et respectent les critères, notamment de proximité géographique, fixés par arrêté du ministre chargé de l'énergie, après avis de la Commission de régulation de l'énergie ».

L'arrêté ministériel indique que les producteurs et consommateurs doivent être « raccordés au réseau basse tension d'un unique gestionnaire du réseau public de distribution d'électricité et [que] la distance séparant les deux participants les plus éloignés n'exède pas deux kilomètres ». De plus, « la puissance cumulée des installations de production [doit être] inférieure à : 3 MW sur le territoire métropolitain continental ; 0,5 MW dans les zones non interconnectées. Pour l'énergie solaire, la puissance considérée est la puissance crête »⁹⁵.

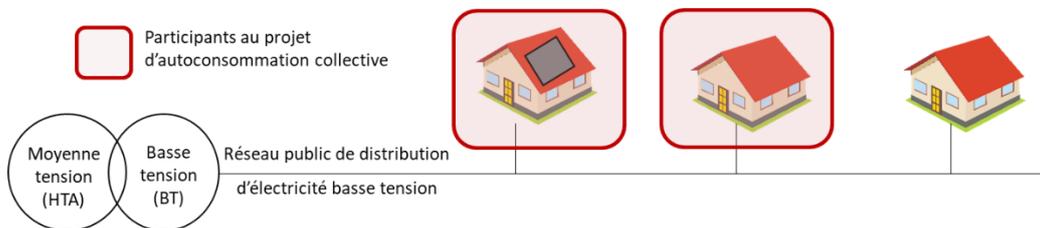


Figure 64 : Schéma de principe d'un projet d'autoconsommation collective en juin 2016 | Source : Auteure, à partir de (Banner 2017)

⁹⁵ MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE, *Arrêté du 21 novembre 2019 fixant le critère de proximité géographique de l'autoconsommation collective étendue*, Journal officiel, n°0273, 24 novembre 2019.

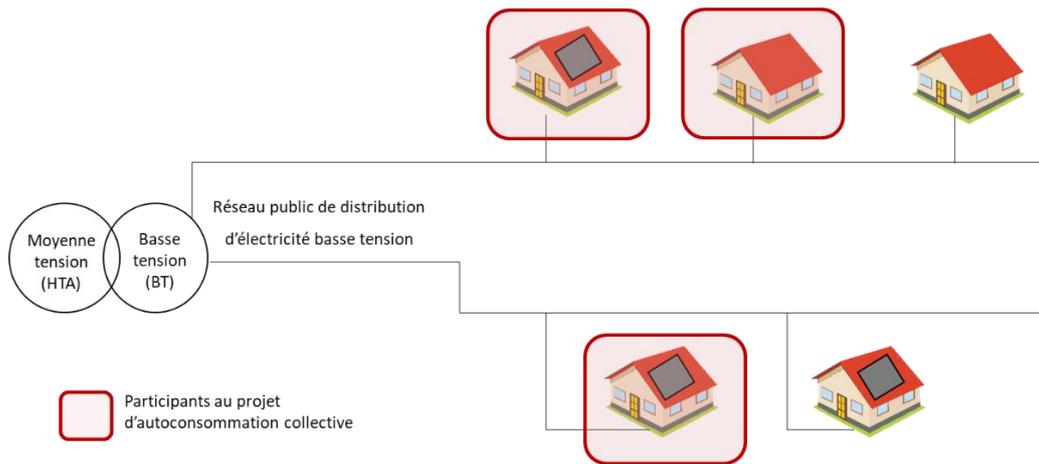


Figure 65 : Schéma de principe d'un projet d'autoconsommation collective en février 2017 | Source : Auteure

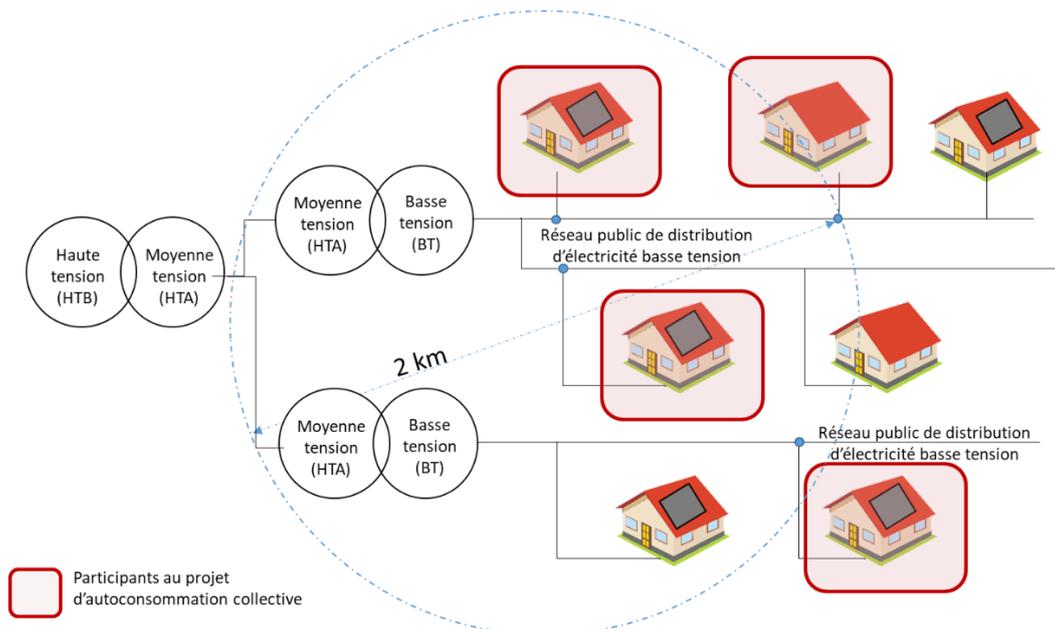


Figure 66 : Schéma de principe d'un projet d'autoconsommation collective en mai 2019 | Source : Auteure

Du point de vue d'un SELBC, ces évolutions géographiques, élargissant au fur et à mesure le périmètre d'un projet d'autoconsommation collective, font évoluer le nombre, et potentiellement le type, d'acteurs producteurs et consommateurs associables à un même SELBC. **Des outils d'aide à la conception peuvent accompagner, au besoin, le dimensionnement du SELBC, envisager la gestion du « stockage » de l'énergie produite, permettre d'envisager les clefs de répartition...**

V.2.i.b SELBC basé sur de la chaleur fatale issue d'activités fortement consommatrices d'électricité en vue d'une réinjection dans un réseau de chaleur urbain

Le second type de SELBC sur lequel nous avons travaillé est basé sur de la récupération de chaleur fatale ou perdue. La récupération de chaleur fatale consiste à valoriser la chaleur émise par un système technique, mais considérée comme déchet, lors d'une consommation électrique, de chaleur à une température supérieure ou de gaz afin de répondre à un service. Si la quantité de chaleur fatale est

suffisante, elle peut alors être réutilisée pour répondre à d'autres services, et principalement celui de chauffer ou de rafraîchir.

La valorisation peut être envisagée au sein du système technique, sur le site de production de l'énergie ou encore à l'extérieur du site. La récupération de chaleur permet ainsi de limiter l'extraction de nouvelles ressources, éviter la construction de nouvelles centrales, éviter des coûts des combustibles, ou encore éviter des coûts de fonctionnement pour la production de chaleur – réduisant ainsi les coûts de production de la chaleur.

En France, l'ADEME considère un gisement industriel de « 109,5 TWh, soit 36 % de la consommation de combustibles de l'industrie, rejetés sous forme de chaleur, dont 52,9 TWh perdus à plus de 100°C ». 16,7 TWh de chaleur fatale (>60°C) sont situés à proximité d'un réseau de chaleur, moyen principal pour valoriser cette chaleur. Actuellement, la chaleur à plus de 100°C est considérée comme la plus facilement valorisable et celle à 60°C permet une valorisation pour des quartiers basse consommation. Le développement de projets de valorisation de chaleur basse température reste aujourd'hui considéré comme une innovation. La valorisation de chaleur fatale était déjà pensée dès la conception du réseau dans le cadre des usines d'incinération des ordures ménagères comme le montre les réseaux de chaleur de Paris⁹⁶ ou de Grenoble⁹⁷. **Aujourd'hui, la valorisation est possible à partir d'autres types d'usines : « la chaleur fatale peut-être issue de sites industriels, de raffineries, de sites de production d'électricité, de station d'épuration des eaux usées, d'usine d'incinération des ordures ménagères, de Data Center, d'hôpitaux » (ADEME 2017). De nouveaux acteurs sont alors associables aux SELBC : les gestionnaires de ces usines en tant que producteurs de chaleur.**

Tout comme les énergies renouvelables, on retrouve le problème d'une production intermittente et peu flexible, qui ne dépend pas cette fois de la météo, mais du fonctionnement de l'entreprise. La valorisation de chaleur peut donc impacter le fonctionnement de l'entreprise ou la fourniture de chaleur aux consommateurs, des risques pour les parties prenantes du projet. **Ainsi les conditions concernant le fonctionnement de l'ensemble du futur système technique sont donc à discuter et à décider dès la phase de conception du système, et des outils d'aide à la conception peuvent accompagner ce processus.**

⁹⁶ CPCU, page « Réseau de chaleur urbain : comment ça marche ? », CPCU, consultée le 22 avril 2020, <https://www.cpcu.fr/reseau-de-chaleur/>.

⁹⁷ CCIAG, page « Histoire », *Compagnie de chauffage*, consultée le 10 février 2020, <https://www.compagniedechauffage.fr/2331-histoire.htm>.

V.2.i.c Présentation du terrain : récupération de chaleur industrielle pour réinjection dans un réseau de chaleur à Dunkerque

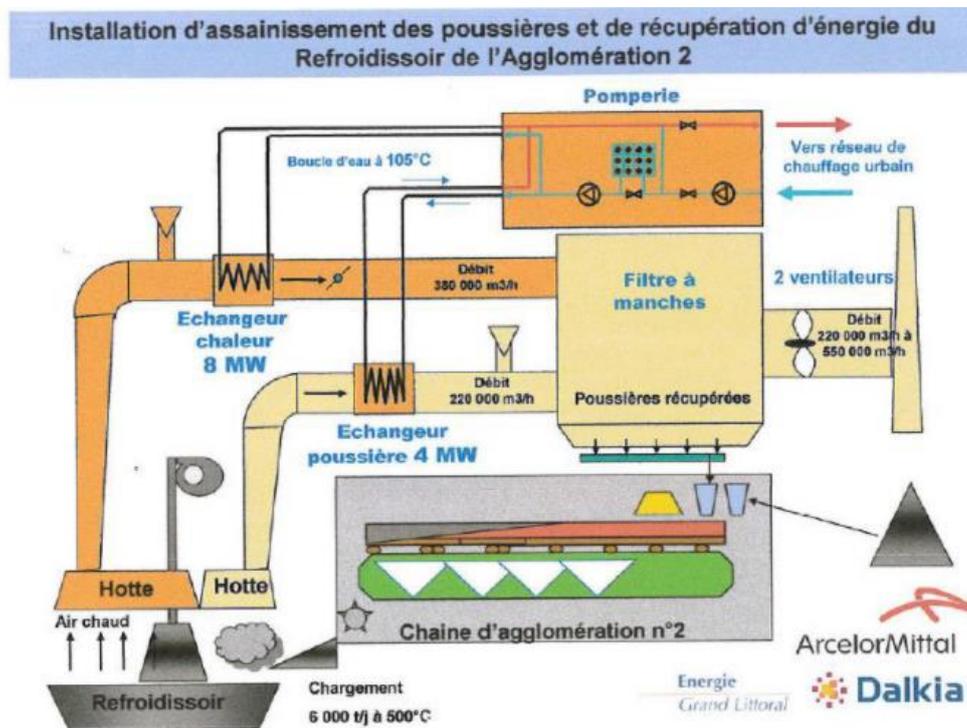


Figure 67 : Représentation graphique de la récupération de chaleur pour la deuxième captation chez ArcelorMittal | Source : Rapport technique de l'exploitation du réseau pour l'exercice 2008 dans (Hampikian 2017)

L'analyse porte sur la récupération de chaleur fatale d'industriels fortement consommateurs d'électricité situés sur le territoire de Dunkerque. Le projet principal présenté consiste à récupérer la chaleur issue de plusieurs unités d'agglomération présentes sur le site d'ArcelorMittal de Dunkerque. Ces unités sont fortement consommatrices d'électricité et produisent de la chaleur fatale. Deux projets de récupération, successifs dans le temps, ont été réalisés et composent donc l'ensemble du SELBC étudié. La première captation de chaleur a été mise en œuvre en 1985. Elle correspond à une puissance énergétique de 20 MW. La seconde captation date de 2008 et correspond à une puissance énergétique disponible de 8 MW. Cette seconde captation est couplée à un système de récupération de poussières (cf. Figure 67). Les deux captations permettent d'injecter dans le réseau environ 100 000 MWh par an. Selon (Hampikian 2017), ce SELBC a impliqué principalement trois acteurs : l'industriel, aujourd'hui ArcelorMittal, le gestionnaire du réseau de chaleur, appelé aujourd'hui Énergie Grand Littoral (EGL), et l'autorité locale associée au périmètre de la valorisation de chaleur, aujourd'hui la communauté urbaine de Dunkerque.

Au travers de l'analyse, (Hampikian 2017) met en évidence des projets de récupération de chaleur annexes, que nous avons donc analysés également. Se basant sur la théorie de l'acteur réseau, les acteurs considérés lors de la conception comme pouvant participer au SELBC sont donc également à prendre en compte. Il peut s'agir de projets envisagés *a posteriori* ou de projets envisagés en parallèle des projets de captation de la chaleur issue des industries d'ArcelorMittal. D'autres acteurs ont ainsi été envisagés pour la récupération de chaleur : Aluminium Dunkerque (aussi appelé Rio Tinto), EDF

pour sa centrale nucléaire et son terminal méthanier, Innocold pour la production de froid créé à l'initiative de la Communauté Urbaine de Dunkerque (CUD), de l'Université du Littoral Côte d'Opale et de Dunkerque LNG. Ainsi, l'identification des contraintes et des objectifs peut également se baser sur ces acteurs (et projets).

V.2.ii Les monographies comme matériaux d'analyse

Cette partie recense les matériaux utilisés dans le cadre de notre analyse. Les quatre SELBC ont été étudiés par les deux chercheuses via des entretiens semi-directifs dans le cadre d'enquêtes qu'elles ont menées pour répondre à leur propre question de recherche. Nous n'avons pas travaillé à partir de ces entretiens, qui ne sont pas disponibles en libre accès, mais à partir des monographies réalisées par les deux chercheuses et publiées dans le cadre de leurs thèses :

- Marmagne (Aubert 2020, 175-200;252-259;284-296;341-347;369-372)
- Les Colibres (Aubert 2020, 201-212;260-262;297-305;348-354;373-374)
- Des minerais au réseau d'agglomération : la récupération de chaleur industrielle à Dunkerque (Hampikian 2017, 120-79)
- Des serveurs informatiques aux radiateurs : data center et réseaux de chaleur au Val d'Europe (Hampikian 2017, 180-234)

Les monographies réalisées offrent une analyse de l'auteure basée sur des extraits d'entretiens appelés verbatims.

V.2.iii Analyse hypothético-déductive et définition des nœuds

L'analyse de ce corpus a été réalisée pour chacun des terrains avec le logiciel d'analyse qualitative de données Nvivo. Le travail a été principalement mené via une analyse hypothético-déductive. Cette démarche consiste à proposer des codages, appelés nœuds dans l'outil Nvivo, qui serviront à l'analyse dans l'idée de découper les textes selon ces codages. Cette sous-partie détaille les différents nœuds afin de présenter notre travail de codage et son apport pour cette thèse.

La première partie des codages est en lien avec nos travaux d'analyse autour des SELBC présentés dans le chapitre 1. En effet, il nous semblait nécessaire de différencier les « ressources » captées (V.2.iii.a), les « vecteurs énergétiques » considérés (V.2.iii.b), ainsi que les « spécificités ou modalités de fonctionnement » (V.2.iii.c) dans l'idée de structurer l'analyse des SELBC étudiés. Les citations et verbatims issus de ces codages nous ont notamment permis d'établir les encadrés du chapitre 1 (cf. I.2).

La deuxième partie des codages est issue de notre question et de nos hypothèses de recherche. Pour rappel, nous faisons l'hypothèse qu'il existe et qu'il est possible d'identifier des raisons influentes et de les associer à des parties prenantes types. Nous avons distingué deux grandes catégories de codages : les différents « acteurs » du SELBC (V.2.iii.d) et les « raisons influentes » (V.2.iii.e).

Bien qu'il s'agisse d'une analyse hypothético-déductive, nous avons cependant accepté d'élargir nos codages prédéfinis à partir des informations identifiées dans le texte. Cela a été le cas lorsque le texte

ne correspondait pas à nos codages, mais pouvait avoir un intérêt pour notre question de recherche, voire pour le travail réalisé dans cette thèse.

V.2.iii.a Nœuds pour le codage des ressources renouvelables et de récupération

Comme présenté dans le chapitre 1, les SELBC sont notamment des systèmes de capture d'énergies renouvelables et de récupération. Ainsi, le nœud principal « CODES1 – RESSOURCES ENR&R » a été ajouté et développé en six nœuds pour les cinq types de ressources renouvelables et pour la chaleur fatale (cf. Figure 68) :

- « RE_Biomasse » pour la biomasse (RE pour Ressources ENR),
- « RE_Chaleur-fatale » pour la chaleur fatale,
- « RE_Eolienne » pour l'énergie éolienne,
- « RE_Géothermie » pour la géothermie,
- « RE_Hydraulique » pour l'hydraulique, et encore
- « RE_Solaire » pour le solaire.

Comme nous l'avons fait pour l'ensemble des catégories de codage, un code « VRAC » est ajouté pour permettre de coder des parties en lien, mais ne correspondant pas tout à fait aux nœuds proposés : ici, le nœud s'intitule « RE_VRAC ». Dans ce cadre, il peut s'agir d'une référence globale aux énergies renouvelables, sans en citer une en particulier, par exemple.

Nom	Fichiers	Références
CODES1_RESSOURCES-ENR&R	0	0
RE_Biomasse	5	19
RE_Chaleur-fatale	2	4
RE_Eolienne	2	2
RE_Géothermie	1	7
RE_Hydraulique	0	0
RE_Solaire	4	21
RE_VRAC	5	7

Figure 68 : Nœuds pour le codage des ressources renouvelables | Source : Auteure - extrait de Nivo

Comme nous pouvons le voir sur l'image ci-dessus, une fois le codage réalisé, l'outil indique le nombre de références associées au nœud, ainsi que le nombre de fichiers différents dont sont issues ces références. Nous avons créé un fichier par monographie.

V.2.iii.b Nœuds pour le codage des vecteurs énergétiques

Les ressources d'énergie renouvelable ou de récupération peuvent être transformées en différents vecteurs énergétiques que nous avons également identifiés. Ainsi nous avons créé le nœud principal « CODES2_VECTEURS-ENERGETIQUES » et les trois nœuds associés :

- « VE_Chaleur » pour la chaleur,
- « VE_Electricité » pour l'électricité, et

- « VE_Gaz » pour le gaz.

Ainsi que le code « VE_VRAC » comme le montre la Figure 69.

Nom	Fichiers	Références
CODES2_VECTEURS-ENERGETIQUES	0	0
VE_Chaleur	6	38
VE_Electricité	6	51
VE_Gaz	4	15
VE_VRAC	1	1

Figure 69 : Nœuds pour le codage des vecteurs énergétiques | Source : Auteure - extrait de Nivo

V.2.iii.c Nœuds pour le codage des propriétés et des caractéristiques

Le troisième codage fait référence à la fois aux deux propriétés majeures des SELBC : la capture et les échanges de flux énergétiques, et à la fois aux caractéristiques des SELBC. C'est pourquoi le nœud principal s'intitule « CODES3_PROPRIETES_&_CARACTERISTIQUES ». Ce nœud a été divisé en plusieurs nœuds (cf. Figure 70).

En ce qui concerne la capture et les échanges de flux énergétiques, les nœuds :

- « P_Capture » pour la capture (P pour Propriété), et
- « P_Echanges » pour les échanges ont été créés.

Comme indiqué dans la présentation du SELBC basé sur de l'électricité produite à partir de panneaux photovoltaïques mutualisés (cf. V.2.i.a), la clef de répartition est une question importante dans le cadre de SELBC sur l'autoconsommation collective, c'est pourquoi nous avons décidé de l'ajouter comme sous-nœud de l'échange. Ce sous-nœud est arrivé à la lecture des monographies, il a donc été créé de manière inductive, à l'inverse des autres nœuds.

En ce qui concerne les caractéristiques, les nœuds sont les suivants :

- « C_Connexion-reseau » pour la connexion du SELBC au réseau (I.2.i.d), avec un sous nœud associé « C_Non-connexion-reseau » qui n'est pas une caractéristique propre aux SELBC mais est un objectif identifié dans le discours des acteurs,
- « C_Efficacité » pour l'efficacité,
- « C_Flexibilité-déplacement-conso-prod » pour la flexibilité, du point de vue des déplacements des courbes de charges ou des courbes de production vis-à-vis l'une de l'autre (I.2.iii.a),
- « C_Flexibilité-stockage » pour la flexibilité du point de vue du stockage (I.2.iii.a),
- « C_Multi-énergies » pour des SELBC multiénergies,
- « C_Mutualisation » pour la mutualisation de systèmes au sein du SELBC (I.2.ii.d),
- « C_Sobriété » pour la sobriété (I.2.iii.b),
- « C_VRAC » pour le vrac, comme fait pour les catégories de nœuds précédentes.

Pour être précise, certaines de ces catégories ont été créées de manière uniquement déductives (« C_Sobriété », « C_Flexibilité-stockage » par exemple) et d'autres de manière inductive, à la lecture des monographies (« C_Mutualisation », « C_Connexion-reseau » par exemple), complétant ainsi les caractéristiques identifiées dans la partie I.2.

Nom	Fichiers	Références
CODES3_PROPRIETES_&_CARACTERISTIQUES	0	0
C_Connexion-reseau	6	51
C_Non-connexion-réseau	4	18
C_Efficacite	5	12
C_Flexibilité-déplacement-conso-prod	3	4
C_Flexibilité-stockage	3	11
C_Multi-énergies	4	13
C_Mutualisation	4	11
C_Sobriete	5	17
C_VRAC	6	58
P_Capture	6	56
P_Echanges	6	39
clef-repartition	4	11

Figure 70 : Nœuds pour le codage des propriétés et des caractéristiques techniques des SELBC | Source : Auteure - extrait de Nivo

V.2.iii.d Nœuds pour le codage des acteurs

Le nœud « CODES4_ACTEURS » est issu de nos hypothèses de recherche. Nous considérons que les raisons influentes sont portées différemment par les acteurs. Il est donc nécessaire d'identifier les acteurs. Pour rappel, dans le chapitre 1, nous avons proposé une typologie d'acteurs fondées sur le rôle des acteurs sur laquelle nous avons basé la définition de nos nœuds. Cherchant à être exhaustive dans l'analyse, nous identifions l'ensemble des acteurs et non uniquement les parties prenantes.

Nom	Fichiers	Références
CODES4_ACTEURS	0	0
Ac_Agrégateurs	0	0
Ac_Aménageurs	2	35
Ac_Architectes	2	10
Ac_Autorités-régulatrices-extérieures-projet	5	95
Ac_Autorités-régulatrices-locales	5	107
Ac_Chargés-maintenance	2	3
Ac_Concepteurs-solutions	6	137
Ac_Consommateurs	6	91
Ac_Développeurs	6	287
Ac_Financeurs	5	44
Ac_Fournisseurs	4	21
Ac_Gestionnaires-réseaux-chaleur	2	128
Ac_Gestionnaires-réseaux-elec-gaz	5	81
Ac_Installateurs	1	1
Ac_Nature	3	8
Ac_Prescripteurs	2	10
Ac_Producteurs	3	141
Ac_Propriétaires	5	29
Ac_Prosumers	4	91
Ac_Riverains	3	27
Ac_Stockeurs	3	4
Ac_VRAC	6	110

Figure 71 : Nœuds pour le codage des acteurs | Source : Auteure - extrait de Nivo

V.2.iii.e Nœuds pour le codage des raisons influentes

Le nœud « CODES5_RAISONS-INFLUENTES » est également issu de nos hypothèses de recherche. Tout d’abord, nous considérons qu’il existe et qu’il est possible d’identifier des raisons influentes au sein du corpus. De plus, nous considérons qu’il existe des raisons influentes de type objectif et contrainte. Proposant de ne modéliser que les raisons influentes quantitatives, dans le cadre de cette thèse, nous avons créé des sous-catégories indiquant si la contrainte est quantitative (envisagée comme modélisable dans le cadre de notre thèse) ou non quantitative (envisagée comme non modélisable dans le cadre de notre thèse). Ainsi, nous ne cherchons pas, dans le cadre de cette thèse, à modéliser les raisons influentes qualitatives. Cependant, comme nous le verrons par la suite, les raisons influentes qualitatives peuvent jouer un rôle tout aussi important. C’est pourquoi il nous semble essentiel de les identifier également.

Ainsi, nous avons créé les catégories suivantes (cf. Figure 72) :

- « RI_Contraintes-objectifs » qui regroupe les nœuds associés aux nœuds des contraintes et objectifs qui sont les suivants :
 - « RI_Contraintes-non-quantitatives », qui regroupe les contraintes non quantitatives,
 - « RI_Contraintes-quantitatives », qui regroupe les contraintes quantitatives,
 - « RI_Objectifs-non-quantitatifs », qui regroupe les objectifs non quantitatifs,
 - « RI_Objectifs-quantitatifs », qui regroupe les objectifs quantitatifs,
- « RI_Raisons-Influentes-autres » qui regroupe les raisons influentes qui ne sont ni considérées comme contraintes ni comme objectifs.

Les contraintes

Pour rappel, nous définissons une **contrainte** (quantitative) comme une relation (sous forme d'équation) qui réduit le champ des possibles et des possibilités de l'assemblage socio-énergétique. Bien que l'analyse n'ait pas été automatique, nous pouvons indiquer, à titre d'exemple, les termes retenus comme liés à la notion de contrainte dans le corpus analysé : contrainte, impossibilité, difficultés, « critère de choix », « une limite », « un minimum technique », devoir, respecter, « s'engager à », nécessiter, obliger, falloir, « avoir besoin », « vouloir absolument », « ne pas pouvoir », « ne pas avoir le droit », « ne plus avoir », « refuser de », « s'opposer à », « décréter que »...

Les objectifs

Pour rappel, nous définissons un **objectif** (quantitatif) comme l'orientation (maximiser ou minimiser) d'une variable (d'optimisation tendant à déplacer le point de convergence calculé au sein du domaine de faisabilité). La direction relève alors d'une intention, d'un désir ou d'une volonté d'un acteur. De même, les termes relatifs à la notion d'objectif utilisés sont les suivants : objectif, ambition, motivation, principe, stratégie, intérêt, volonté, maximiser, minimiser, souhaiter, vouloir, préférer, encourager, « chercher à », « essayer de », « viser à », « le maître mot », « la logique », « y voir la possibilité de », « y voir un moyen de », « y percevoir la possibilité de », « cela permet de », « afin de », « l'idée était »...

Les autres raisons influentes

Les « raisons influentes autres » ne répondent pas à ces définitions ou aux termes identifiés, mais peuvent être identifiées comme ayant une influence sur la forme finale du SELBC.

Nom	Fichiers	Références
CODES5-RAISONS-INFLUENTES	0	0
RI_Contraintes-objectifs	0	0
RI_Contraintes-non-quantitatives	5	136
RI_Contraintes-quantitatives	5	70
RI_Objectifs-non-quantitatifs	6	136
RI_Objectifs-quantitatifs	6	76
RI_Raisons-influentes-autres	6	263

Figure 72 : Nœuds pour le codage des raisons influentes | Source : Auteure - extrait de Nivo

Thématiques des raisons influentes

Au cours du codage, nous nous sommes rendue compte que certaines thématiques liées aux raisons influentes étaient répétées. C'est pourquoi nous avons ajouté le code principal « RI_Thématiques », ainsi que les codes suivants (cf. Figure 73) :

- « RI_T_argent-économie »,
- « RI_T_dépendance »,
- « RI_T_incertitude »,
- « RI_T_pollution_écologie_CC_environnement »,
- « RI_T_propriété-responsabilité »,
- « RI_T_réputation_expertise »,
- « RI_T_technique »,
- « RI_T_temporalité ».

Nom	Fichiers	Références
RI_Thématiques	0	0
RI_T_argent_économie	6	84
RI_T_dépendance	5	50
RI_T_incertitude	5	20
RI_T_pollution_écologie_CC_environne	6	37
RI_T_propriété-responsabilité	6	31
RI_T_réputation_expertise	4	16
RI_T_technique	3	31
RI_T_temporalité	2	12

Figure 73 : Nœuds pour le codage des thématiques pour les raisons influentes | Source : Auteure - extrait de Nivo

Ce codage dépasse notre question initiale de recherche et nous ne l'avons pas traité dans cette thèse. En revanche, ce peut être une piste de réflexion pour une classification des contraintes, objectifs et autres raisons influentes.

VRAC

Une catégorie VRAC est également ajoutée, à l'instar des autres catégories de codage.

Dans ce vrac, trois sous-catégories ont été créées (cf. Figure 74) :

- « RI_Besoins_informations-souhaitées » lorsqu'est explicité un besoin par les acteurs ou plus précisément un besoin d'information,
- « RI_intérêts-divergents » lorsqu'est explicité le fait que des acteurs ont des intérêts divergents dans la conception du SELBC, et
- « RI_Outils-logiciels » en lien avec le rôle des outils logiciels.

RI_VRAC	1	1
RI_Besoins_Informations-souhaitées	4	36
RI_Intérêts divergents	3	36
RI_Outils-logiciels	2	2

Figure 74 : Nœuds pour le codage VRAC en lien avec les raisons influentes | Source : Auteure - extrait de Nivo

V.2.iii.f Nœud pour le codage VRAC

Un dernier codage « VRAC » regroupe des analyses ou des passages qui ne sont pas en lien avec notre question de recherche (cf. Figure 75).

VRAC	7	104
------	---	-----

Figure 75 : Codage VRAC | Source : Auteure - extrait de Nivo

V.2.iv Synthèse de la méthodologie d'analyse pour l'identification des raisons influentes des parties prenantes

La figure ci-dessous présente de manière synthétique les différents éléments développés dans les sous-parties précédentes (cf. Figure 76). Ainsi, la première étape a consisté en la définition du corpus à analyser (cf. V.2.i et V.2.ii). Nous avons choisi de travailler à partir de monographies sur quatre cas d'études. Nous aurions pu également travailler à partir d'entretiens. La seconde étape consiste à créer des nœuds de codage issus de nos hypothèses et analyses (cf. V.2.iii). Parmi ceux créés, les principaux à retenir, vis-à-vis des résultats présentés dans la partie suivante, sont :

- les nœuds associés aux différents types d'acteurs, et
- les nœuds associés aux raisons influentes, et surtout ceux pour les contraintes et les objectifs.

La troisième étape consiste à étudier les contraintes et objectifs identifiés et associées à des acteurs dans l'idée d'en produire une synthèse, comme réalisé dans la partie suivante. Les objectifs et contraintes quantitatives ont vocation à être reformulés mathématiquement pour être modélisés dans la bibliothèque de modèles.

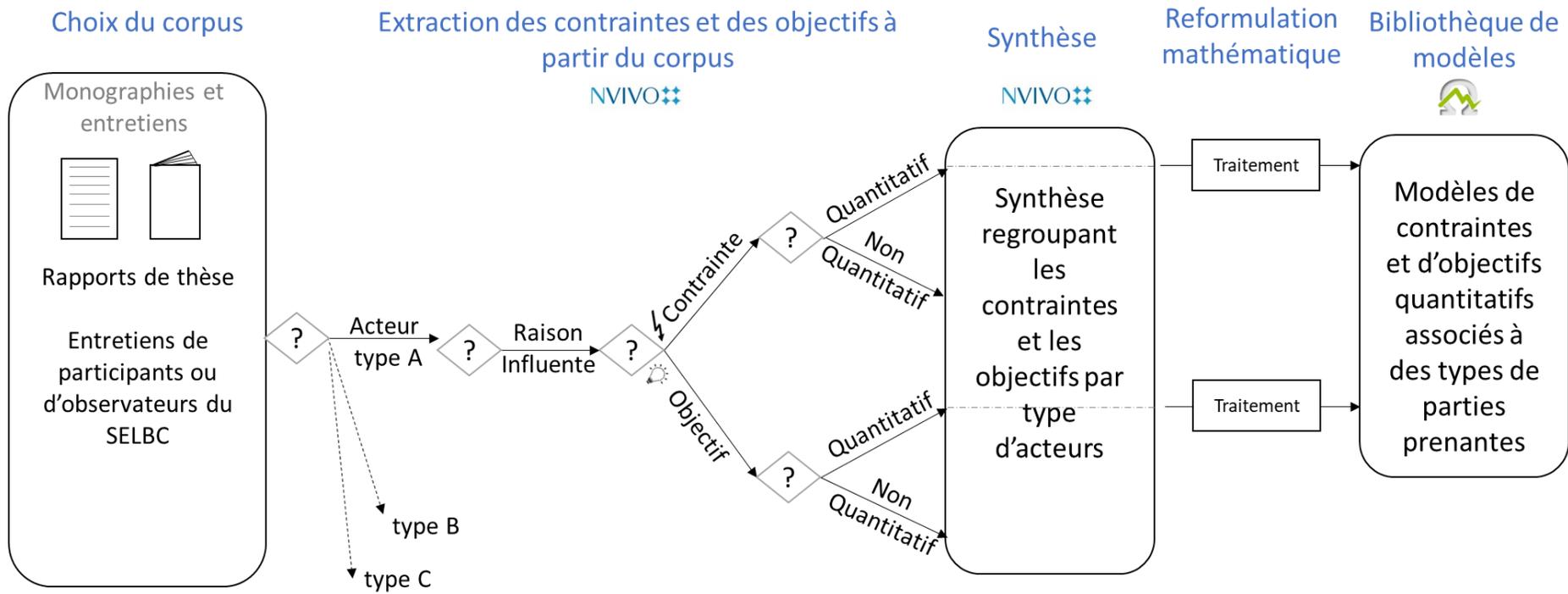


Figure 76 : Méthodologie pour l'identification et la modélisation des contraintes et objectifs d'acteurs dans l'outil d'aide à la conception | Source : Auteure

V.3 Exemples de résultats de l'analyse et proposition de modélisation : application au cas de la valorisation de chaleur fatale à Dunkerque

Cette partie est dédiée aux résultats obtenus suite à l'application de la méthodologie présentée dans la partie précédente. Une fois le codage des monographies réalisé, il ne s'agit plus de travailler à partir des textes dans leur globalité, mais à partir d'extraits, appelés citations ou verbatims s'il s'agit d'extraits d'entretiens, codés dans les nœuds que nous avons décrits dans la partie précédente (cf. V.2.iii). Cette étape est appelée l'« inférence » (Abrial et Louvel 2011, 76). (Abrial et Louvel 2011) indique que « l'analyste ne travaille ensuite plus sur le matériau brut, mais sur le matériau issu du découpage. Cela lui permet de sélectionner, de regrouper et de comparer les informations pertinentes pour sa problématique. Le plus souvent, l'analyste travaille entretien par entretien. Cette étape est un préalable indispensable à la comparaison rigoureuse des entretiens d'un corpus ». Dans notre cas il ne s'agira pas d'entretiens, mais de monographies. Nous nous appuyons sur les citations et verbatims pour l'identification des objectifs et des contraintes par type d'acteurs.

Dans l'idée de présenter le travail d'inférence réalisé, ainsi que les résultats obtenus, sans pour autant alourdir ce rapport de thèse, nous continuons de présenter uniquement la démarche et les résultats pour le cas d'étude de valorisation de chaleur fatale à Dunkerque. Les résultats obtenus pour les différentes études sont disponibles en annexe (Annexe E, Annexe F et Annexe G).

Pour donner un ordre de grandeur du codage, pour la monographie de Dunkerque, 2305 références ont été identifiées et sont réparties entre 65 nœuds. Dans l'idée d'identifier les objectifs et les contraintes pour chaque acteur, nous avons, via Nvivo, sélectionné l'ensemble des citations et verbatims correspondant à la fois aux différents nœuds des acteurs et aux nœuds liés aux objectifs, aux contraintes et aux autres raisons influentes, ce qui est résumé sous forme de matrice dans la Figure 77⁹⁸. Cette extraction correspond à :

- 89 verbatims ou citations pour les contraintes,
- 109 verbatims ou citations pour les objectifs, et
- 100 verbatims ou citations pour les autres raisons influentes.

⁹⁸ Cette image est obtenue via une requête de croisements matriciels  entre les nœuds correspondants aux types d'acteurs et le fichier correspondant à la monographie sur laquelle ont été faits les codages. Les requêtes utilisées sont disponibles dans l'onglet situé en bas à gauche : Rechercher /

Rechercher

Requêtes

Résultats de Requête

Résultats de Requête : . Il suffit alors de sélectionner la requête appropriée parmi les quatre cas analysés.

	A : RI_CO_Contraintes non quantitatives	B : RI_CO_Contraintes quantitatives	C : RI_CO_Objectifs non quantitatifs	D : RI_CO_Objectifs quantitatifs	E : RI_Raisons-influentes-autres
1 : Ac_Agrégateurs	0	0	0	0	0
2 : Ac_Aménageurs	0	0	0	0	0
3 : Ac_Architectes	0	0	0	0	0
4 : Ac_Autorités-régulatrices-externes-projet	0	5	1	2	3
5 : Ac_Autorités-régulatrices-locales	5	7	26	11	21
6 : Ac_Chargé_maintenance	0	0	0	0	0
7 : Ac_Concepteurs-solutions	0	0	0	1	0
8 : Ac_Consommateurs	1	1	1	0	2
9 : Ac_Développeurs	0	0	0	0	0
10 : Ac_Financeurs	0	0	0	0	0
11 : Ac_Fournisseurs	0	0	0	0	0
12 : Ac_Gestionnaires-réseaux-chaleur	7	9	10	5	18
13 : Ac_Gestionnaires-réseaux-élec-gaz	0	0	0	0	0
14 : Ac_Installateurs	0	0	0	0	0
15 : Ac_Nature	3	0	0	1	2
16 : Ac_Prescripteurs	1	0	2	0	1
17 : Ac_Producteurs-exploitants	11	12	17	14	28
18 : Ac_Propriétaires	1	0	0	0	0
19 : Ac_Prosumers	0	0	0	0	0
20 : Ac_Riverains	0	0	0	0	0
21 : Ac_Stockeurs	0	0	0	0	0
22 : Ac_VRAC	2	0	0	1	1

Figure 77 : Tableau de répartition des citations et verbatims portant sur les raisons influentes en fonction des types d'acteurs pour le cas d'étude de Dunkerque | Source : Auteure - extrait de Nivo

Plusieurs verbatims ou citations peuvent référer à une même raison influente et un même verbatim peut référer à plusieurs raisons influentes⁹⁹. Le nombre conséquent de verbatims et citations nous amène à ne pas présenter l'ensemble des contraintes et objectifs identifiés, mais à en sélectionner certains. Du point de vue de notre démarche, il nous semble pertinent de présenter des objectifs et contraintes identifiés qui ne soient pas déjà modélisés dans l'outil OMEGAAlpes. Nous avons cherché à identifier des raisons influentes quantitatives et non quantitatives. Nous avons également distingué les contraintes portées par les acteurs des contraintes subies par les acteurs. Les contraintes portées par les acteurs sont choisies. Les acteurs pourraient décider, par eux-mêmes de ne pas respecter cette contrainte, sans nécessiter le recours à d'autres acteurs.

Le projet global de valorisation de chaleur se déroulant sur plus de 20 ans, de 1986 à 2008, de nombreux acteurs sont identifiés dans le cadre de ce projet. La répartition des citations selon les types acteurs est très hétérogène. Certains types d'acteurs sont cités à de nombreuses reprises comme le producteur (de chaleur), l'autorité locale régulatrice et le gestionnaire du réseau de chaleur. Il s'agit des trois acteurs du projet considérés comme centraux par (Hampikian 2017). De plus, comme nous le verrons, certains évoluent dans leur statut ou sont remplacés. D'autres types d'acteurs ne sont pas du

⁹⁹ Il faut également savoir que tous les verbatims et toutes les citations ne sont pas forcément à garder cet acteur. En effet, il y a les acteurs qui portent la raison influente, mais d'autres acteurs peuvent être mentionnés dans cette dernière. Voici un exemple : « Ils [les acteurs locaux] suivent en outre en cela les incitations d'origine nationale et européenne à une telle valorisation [via le Centre de Valorisation Energétique, incinérateur] ». Deux types d'acteurs existent alors :

- « Ils » qui correspond aux acteurs locaux, qui ne portent pas l'objectif de développer la valorisation pour le traitement de déchets, et
- les acteurs nationaux et européens qui portent l'objectif de développer la valorisation pour le traitement de déchets.

Les verbatims sont donc à analyser avec attention : c'est le rôle du chercheur.

tout mentionnés. Cela signifie que ce type d'acteurs n'intervient pas dans la conception ni dans l'opération du SELBC pour le cas que nous étudions, ou du moins ne sont pas cités comme tels. Nous pouvons émettre des hypothèses permettant d'expliquer l'absence de certains types d'acteurs. Tout d'abord, le SELBC étudié s'arrêtant à l'étude de la chaleur, nous n'avons pas identifié d'acteurs de l'électricité pour les rôles d'agrégateur, de fournisseur, de gestionnaire de réseau de distribution d'électricité ; bien qu'il puisse y en avoir si la consommation d'électricité était intégrée dans les contours du SELBS étudié. De même, il n'y a pas de gestionnaire de réseau pour le gaz. De plus, la chaleur étant directement récupérée par le gestionnaire du réseau, le rôle de *prosumer* (cas où la chaleur serait consommée par l'industrie la produisant) n'a donc pas été identifié. Par ailleurs, aucun stockage n'est prévu, il est donc logique que le rôle de stockeur soit absent. Le SELBC ayant été développé sur des installations existantes, aucun aménageur, ni architecte, n'est identifié. De plus, aucun rôle d'installateur n'a été identifié : on peut supposer que ce travail a été réalisé en interne par le gestionnaire du réseau de chaleur.

Nous présentons dans la suite des contraintes et objectifs identifiés via notre analyse par catégorie d'acteurs : le développeur (V.3.i), les acteurs opérateurs (V.3.ii), les acteurs régulateurs (V.3.iii), ainsi que les autres acteurs identifiés (V.3.iv). Comme indiqué précédemment, nous avons fait le choix de ne présenter qu'une partie des contraintes et des objectifs identifiés pour simplifier la présentation des résultats obtenus.

V.3.i Acteur développeur

L'acteur développeur est celui qui porte le projet. Pour rappel, l'acteur développeur est défini dans le rapport de l'IAU comme « assur(ant) les relations avec tous les acteurs liés au projet (...) afin de les convaincre de l'intérêt du projet » (Vaisman et al. 2018). La catégorie de développeur est large. Dans le cas de ce projet de valorisation de chaleur, nous avons identifié **la collectivité locale** comme développeur (qui sera successivement le **Syndicat Intercommunal de Chauffage Urbain de la Région Dunkerquoise (SICURD)**, **la ville de Dunkerque** puis la **Communauté Urbaine de Dunkerque (CUD)** selon l'acteur possédant la compétence énergie). En effet, (Hampikian 2017, 135-37; 143) indique pour la première captation : « En 1982, la ville de Dunkerque commande une étude visant à évaluer la pertinence technicoéconomique de différentes ressources : une chaufferie charbon, l'utilisation des gaz sidérurgiques, la chaleur produite par la centrale thermique d'EDF (la centrale de Gravelines), et enfin, la « récupération de chaleur dans l'établissement dunkerquois de la Société Usinor »¹⁰⁰. (...) Les élus locaux, au travers du SICURD, prennent alors contact avec le sidérurgiste pour lui proposer la solution, dont ils s'engagent à financer l'ensemble des infrastructures ». Pour la seconde captation : « les discussions fréquentes entre le SICURD, Dalkia et Arcelor, font apparaître cette conjonction d'intérêts et le président du SICURD fait savoir par un courrier officiel adressé au directeur du site industriel, dès 2004, qu'une étude a été confiée à un bureau d'études par EGL pour analyser la

¹⁰⁰ Ville de Dunkerque, Fiche technique pour la pré-étude d'un réseau de chauffage urbain dans la région dunkerquoise, 1982

faisabilité technico-économique d'une deuxième captation ». Dans la monographie réalisée par Hampikian, on note qu'il ne s'agit pas, pour les autorités locales, de développer uniquement ce projet, mais d'envisager également d'autres projets permettant d'approvisionner en chaleur le réseau de chaleur urbain.

Nous avons choisi de mettre en évidence deux objectifs, une contrainte portée et une contrainte subie associés à cet acteur.

Objectif quantitatif : stratégie pour répondre à l'objectif « 3 fois 20 » du paquet énergie climat adopté en 2008 par l'Union Européenne

Cet objectif ne porte pas directement sur la récupération de chaleur fatale d'ArcelorMittal (réalisée quelques années auparavant). Il est cité pour le développement d'autres SELBC qui ont suivi le projet d'ArcelorMittal. Les projets des collectivités s'inscrivent dans des stratégies plus globales et notamment celles fixées par l'État et l'Union Européenne. Ainsi (Hampikian 2017, 163) indique : « cette ambition [doubler en puissance le réseau de chaleur] fait en particulier partie de la **stratégie de la CUD**¹⁰¹ pour répondre aux objectifs « 3 fois 20 » sur la partie de son bilan énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre liée à la chaleur : « *pour la chaleur, il faut doubler le réseau de chaleur actuel. C'est clair, en puissance il faut 140 MW installés de puissance de chaleur* » (Entretien avec le directeur de la direction énergie de la CUD – 02/06/2014) ». Pour cela, la collectivité lance une étude qui « analyse les autres potentiels de récupération de chaleur fatale industrielle ainsi que d'autres types de source, notamment la récupération sur le Centre de Valorisation Énergétique (CVE) ». Cet objectif porte sur une échelle plus grande que l'échelle du SELBC, échelle de notre modélisation. Nous n'avons donc pas intégré cet objectif dans notre outil. En revanche, dans le cadre d'un outil à l'échelle d'un territoire, cet objectif pourrait, par exemple, être modélisé par l'objectif de maximiser le taux d'énergies de récupération sur le territoire.

Contrainte portée quantitative : doubler le réseau de chaleur actuel pour répondre à l'objectif « 3 fois 20 » de la loi de transition énergétique

Cet objectif peut également être vu comme une contrainte portée par le développeur, utilisant les termes « il faut ». En effet les acteurs indiquent « *pour la chaleur, il faut doubler le réseau de chaleur actuel. C'est clair, en puissance il faut 140 MW installés de puissance de chaleur* » (Entretien avec le directeur de la direction énergie de la CUD – 02/06/2014) ». Cette contrainte va orienter le développement des SELBC pour la valorisation de chaleur mais nous n'avons pas identifié d'impact sur le SELBC lui-même. C'est pourquoi nous ne proposons pas de modélisation.

Contrainte subie non quantitative : limitation du périmètre envisagé

¹⁰¹ Les termes indiqués en gras renvoient à la classification des raisons influentes.

L'impossibilité d'étendre le réseau de chaleur sur une commune est une contrainte subie par le développeur, qui doit donc la prendre en compte et s'y adapter. Cette commune ne peut donc pas bénéficier de la valorisation de chaleur fatale. (Hampikian 2017, 124) indique : « en 1987, suite aux résultats d'études montrant **l'impossibilité** d'étendre le réseau à la commune de Grande-Synthe dans un futur proche, cette dernière se retire du syndicat [SICURD] ». Nous n'en savons pas plus sur cette impossibilité, que nous considérons alors comme subie. Cette contrainte diminue le nombre de consommateurs et d'autres producteurs envisageables pour le SELBC, changeant alors l'assemblage.

V.3.ii Acteurs opérateurs

Les acteurs opérateurs identifiés pour ce SELBC sont donc les suivants : les consommateurs (V.3.ii.a), le gestionnaire du réseau de chaleur (V.3.ii.b) et le producteur de chaleur fatale (V.3.ii.c).

V.3.ii.a Consommateurs

Les consommateurs du réseau de chaleur peuvent avoir des consommations différentes. (Hampikian 2017, 133-34) indique : « du côté de la consommation, les abonnés du réseau sont majoritairement des équipements publics et des logements sociaux, complétés, à la marge, de quelques logements collectifs privés et bâtiments du secteur tertiaire (...). En tout, ces usagers représentent l'équivalent de 50 000 habitants, la ville de Dunkerque en comptant environ 89 000 ». Dans un entretien, un responsable opérationnel à ArcelorMittal confirme en indiquant que la chaleur « *s'en va à Dunkerque réchauffer les petits vieux, les hôpitaux, la piscine ...* » (Entretien avec un responsable opérationnel – ArcelorMittal – 16/04/2015 – réalisé par Z. Hampikian) (Hampikian 2017, 130). Nous les appelons dorénavant ces consommateurs : **les « abonnés du réseau »**. Leur nœud socio-énergétique est restreint à leurs unités de consommation : « équipements publics » pour l'« acteur public », radiateurs pour les habitants...

Nous n'avons pas identifié d'objectifs liés aux consommateurs : cela peut s'expliquer par le fait que, dans cet assemblage, les abonnés du réseau ne semblent pas avoir été impliqués dans la définition du SELBC. Nous avons néanmoins identifié une contrainte portée par un consommateur dans un des projets annexes que nous présentons ci-dessous.

Contrainte quantitative portée : Contrainte d'une consommation d'énergie continue

Un terminal méthanier est identifié par la collectivité pour alimenter un réseau de froid, mais il produit de manière irrégulière. La contrainte alors identifiée pour les consommateurs est la nécessité d'une consommation d'énergie continue dans le temps. Hampikian explique : « D'abord, le modèle de fonctionnement d'un terminal méthanier n'est pas continu puisque dépendant des dynamiques de consommation de gaz : *« un terminal méthanier ça ne tourne pas 100% du temps, donc l'énergie disponible est très importante mais elle n'est pas disponible tout le temps »* (Entretien avec le responsable de la mission innovation et développement industriel de la CUD – 04/06/2014). Ceci implique en particulier qu'une installation qui consommerait du froid en provenance d'un terminal **devrait** prévoir un système alternatif de production [pour assurer une fourniture continue] » (Hampikian 2017).

Du point de vue de la modélisation, il est tout à fait possible de modéliser cette contrainte en modélisant une courbe de charge fixe ou une puissance minimale pour le système de consommation. Pour nous, cela signifie que techniquement, il est nécessaire de suivre cette courbe de charge ou de ne pas descendre en dessous de la puissance minimale demandée. Ces contraintes peuvent être techniques (si les installations le requièrent) ou choisies (si l'on se base sur les besoins exprimés d'un consommateur).

Il nous semble donc intéressant de différencier ces deux cas et de proposer une modélisation associée au modèle d'acteur pour la contrainte choisie. Il s'agit alors d'ajouter une valeur de puissance de consommation minimale pour une ou plusieurs unités de consommation. L'intérêt de cette méthode (et de l'ensemble des méthodes développées dans cette partie), nommée *add_power_consumption_minimum*¹⁰², est que la contrainte peut être ajoutée à une partie des unités du domaine de responsabilité de l'acteur : il faut alors les ajouter dans le paramètre d'entrée *operated_unit_list*, ou à l'ensemble du domaine de responsabilité. En revanche, cette contrainte ne pourra être ajoutée qu'aux unités énergétiques qui font partie du domaine de responsabilité de l'acteur. Si ce n'est pas ce qui est demandé par le modélisateur, un message d'erreur apparaît. Si aucune unité énergétique n'est précisée dans le paramètre d'entrée *operated_unit_list*, la contrainte est ajoutée à l'ensemble des unités énergétiques du domaine de responsabilité de l'acteur. Ces nuances sont modélisées dans l'outil¹⁰³ et succinctement présentées ci-dessous en langage mathématique :

def add_power_consumption_minimum(self, min_p, cst_operated_unit_list = None)

Si cst_operated_unit_list :

∀ consumption_unit dans cst_operated_unit_list :

$$P_{consumption_unit}[t] \geq \min_p \quad \forall t$$

Sinon :

∀ consumption_unit dans operated_unit_list :

$$P_{consumption_unit}[t] \geq \min_p \quad \forall t$$

La fonction pourrait être utilisée comme suit dans un cas d'étude :

Consumer.add_power_consumption_minimum $\left(\begin{array}{l} \min_p = 10, \text{ time,} \\ \text{cst_operated_unit_list} = [\text{industry1}, \text{industry2}] \end{array} \right)$

¹⁰² Le code est disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/actor/operator_actors/consumer_actors.py.

¹⁰³ Le code est disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/actor/operator_actors/operator_actors.py.

Chaque consommateur consommera alors à chaque pas de temps au moins 10 kWh (l'unité n'est pas explicitée dans l'outil). Les méthodes associées à une puissance maximale, à une énergie minimale ou maximale, ont également été développées.

V.3.ii.b Gestionnaire réseau chaleur

Le gestionnaire du réseau de chaleur est également un acteur opérateur du projet. Il s'agit d'un des trois acteurs principaux du projet de valorisation de chaleur fatale à Dunkerque. Le réseau est public, géré via une délégation de service public (DSP) de type concession. Le gestionnaire est actuellement **Energie Grand Littoral (EGL)**. L'exploitation du réseau de chaleur commence en 1958 avec la **Compagnie Générale de Chauffe (CGC)** qui, en 1998, devient Dalkia, avant que la filiale locale de Dalkia : **Energie Grand Littoral (EGL)** soit créée. Le nœud socio-énergétique correspondant est donc le réseau de chaleur de la récupération de chaleur sur les installations du producteur de chaleur d'ArcelorMittal à la fourniture d'énergie sur les échangeurs des clients.

De nombreux objectifs et contraintes ont été mis en évidence pour le gestionnaire du réseau de chaleur. Nous présentons ci-dessous deux objectifs et une contrainte.

Objectif quantitatif : Objectif de récupérer de la chaleur & de maximiser la récupération de chaleur

Un objectif avancé par le gestionnaire du réseau est le souhait de récupérer de la chaleur. (Hampikian 2017, 143) identifie dans un extrait du registre aux délibérations du Syndicat Intercommunal de Chauffage Urbain de la Région Dunkerquoise (SICURD) que « les sociétés EGL/Dalkia et Arcelor Sollac se sont associées pour réaliser conjointement ce projet, car chacune d'elles a sa propre **motivation** : un **intérêt** énergétique par la récupération thermique pour EGL et un intérêt environnemental par la réduction des émissions de poussières pour Arcelor ». (Hampikian 2017, 142) indique également que « l'exploitant du réseau voit en la chaleur fatale une source de chaleur à la gestion matérielle aisée puisque la production n'a pas à être gérée par ce dernier ». Cet objectif est exprimé de manière trop générique pour pouvoir en proposer une modélisation.

Mais nous considérons que l'objectif de maximiser la récupération de chaleur existe également. Dans un entretien, un responsable opérationnel d'ArcelorMittal explicite : « *Je ne veux pas mettre un peu plus de perlimpinpin pour que ça chauffe plus, ce n'est pas notre intérêt. (...) Eux [EGL], oui, c'est leur intérêt. Que nous ... fournir beaucoup d'énergie, c'est pas là où on gagne de l'argent. Et quelque part on aimerait en fournir un maximum, parce que ça voudrait dire que nos chaînes fonctionnent bien et qu'elles sont fiables, et donc on travaille sur la fiabilité mais pour autre chose, pas pour la chaleur* » (Entretien avec un responsable opérationnel – ArcelorMittal – 16/04/2015) (Hampikian 2017, 140).

L'objectif « récupérer de la chaleur » consiste à choisir un assemblage plutôt qu'un autre : nous ne le modélisons donc pas. Maximiser la récupération de chaleur est un objectif modélisable. Cependant, l'unité de production de chaleur fatale ne fait pas partie du domaine de responsabilité du gestionnaire du réseau. Il n'est donc pas possible de maximiser directement la production de chaleur fatale, d'autant plus que, dans la citation précédente, le producteur indique que ce n'est pas son objectif. C'est pourquoi il nous semble plus adapté que l'objectif, pour le gestionnaire du réseau, correspondant à maximiser la récupération de chaleur, consiste à minimiser la production propre au gestionnaire de

réseau¹⁰⁴. De même que pour la contrainte présentée précédemment, l'objectif peut s'appliquer à l'ensemble des unités du domaine de responsabilité ou à une partie (par exemple il peut être également prioritaire de brûler les ordures ménagères), mais uniquement aux unités de production du domaine de responsabilité.

def minimize_production(self, obj_operated_unit_list = None)

Si *obj_operated_unit_list* :

\forall *production_unit* dans *obj_operated_unit_list* :

$$\min \sum_t p_{production_unit}[t]$$

Sinon :

\forall *production_unit* dans *operated_unit_list* :

$$\min \sum_t p_{production_unit}[t]$$

La fonction pourrait être utilisée comme suit dans un cas d'étude :

HeatGridOperator.minimize_production (obj_operated_unit_list =[CoalProd])

Objectif non quantitatif : Minimiser la dépendance à la production et les impacts d'un arrêt de la production de chaleur fatale

Un enjeu fort de ce type de SELBC est la dépendance que ce type d'installation crée entre le producteur et le gestionnaire du réseau de chaleur. Un objectif des acteurs (également identifié dans le cadre du projet de récupération de chaleur du data center au Val d'Europe, cf. Annexe G) est donc de chercher des moyens de minimiser la dépendance. (Hampikian 2017, 163; 148) cite ainsi Michel Delebarre, ancien maire de Dunkerque et président de la CUD : « *Quand vous partez d'une source d'énergie, vous avez toujours le risque qu'il se passe quelque chose. Donc si on peut diversifier un peu, c'est bien* » (Entretien avec Michel Delebarre – ancien maire de Dunkerque et président de la CUD 15/12/2015). Elle indique également que « les acteurs **cherchent** à contrer les risques d'interpénétration des processus, tout particulièrement parce qu'ils perçoivent la possibilité que l'échange s'arrête ».

Dans les cas étudiés, les acteurs répondent à cet objectif en proposant des assemblages adaptés à la situation. Pour Dunkerque, il s'agit notamment de diversifier les sources de production : « *il vaut mieux récupérer un peu moins à plus de personnes que tout à un seul* » (Entretien avec le responsable de la mission innovation et développement industriel de la CUD – 04/06/2014). Au Val d'Europe, la solution déployée consiste à dissocier la boucle de chaleur liée au data center de celle reliée aux

¹⁰⁴ Le code est disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/actor/operator_actors/grid_operator_actors.py.

consommateurs. Cet objectif transforme donc l'assemblage du SELBC et nous ne le modélisons donc pas.

Contrainte portée quantitative : S'imposer un mix énergétique basé sur au moins 50% d'EnR&R

Une contrainte que le gestionnaire de réseau s'impose est celle d'avoir un mix énergétique basé sur plus de 50% d'énergies renouvelables et de récupération (EnR&R). Cela est lié à la taxation qui évolue de 20%, si le mix énergétique est à moins de 50% d'EnR&R, à 5,5% si le mix énergétique est au moins à 50% d'EnR&R. Un responsable de l'exploitation du réseau explique : « *Le problème c'est que si ça s'arrête il faut remplacer par du fioul lourd et nous il faut qu'on ait plus de 50% d'ENR. Actuellement on a 60% et ça nous donne droit à une TVA à 5.5%, mais si on passe en dessous de 50%, la TVA passe à 20% ! Et c'est vérifié bien sûr. Tous les trois mois j'envoie un tableau de suivi à un BET [Bureau d'Études Techniques] qui vérifie* » (Entretien avec le responsable de l'exploitation du réseau – EGL – 03/02/2015) (Hampikian 2017, 152).

D'un point de vue modélisation, nous proposons de caractériser les unités de production différenciant la production renouvelable de la production non renouvelable. Ainsi, un nouveau paramètre *rr_energy* (pour renewable and recovery energy) a été ajouté sur les unités de production permettant d'indiquer si l'énergie produite doit être considérée comme renouvelable. Par défaut, la production n'est pas considérée comme renouvelable.

Les contraintes *add_RR_energy_rate_minimum_over_the_study* et *add_RR_energy_rate_minimum_at_each_time_step* ont ensuite été ajoutées au gestionnaire du réseau de chaleur¹⁰⁵, selon si l'on souhaite calculer le taux de renouvelable à chaque pas de temps ou sur la période de l'étude. Elles s'appliquent à l'ensemble des nœuds énergétiques du gestionnaire. L'intérêt de cette contrainte est que le fonctionnement des unités de production se fera également en fonction de ce critère.

```
def add_RR_energy_rate_minimum_over_the_study(self, percentage_rate = 50):
```

```
     $\forall$  operated_node dans self.operated_node_list:
```

```
         $\forall$  pole dans operated_node:
```

$$\sum_{prod \in rr_energy_production} \sum_t p_{prod}[t] \geq percentage_rate / 100 * \sum_{prod \in production} \sum_t p_{prod}[t]$$

La fonction pourrait être utilisée comme suit dans un cas d'étude :

```
HeatGridOperator.add_RR_energy_rate_minimum_over_the_study(percentage_rate = 60)
```

¹⁰⁵ Le code est disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/actor/operator_actors/grid_operator_actors.py.

Le producteur de chaleur principal est l'industriel **ArcelorMittal Dunkerque**. L'industrie a été rachetée à plusieurs reprises, prenant le nom de Usinor, puis Usinor-Sacilor, puis Arcelor, et enfin ArcelorMittal. Il est à noter que l'État est devenu actionnaire majoritaire en 1970, puis a nationalisé l'entreprise en 1982, avant de revendre l'entreprise en 1995. Comme indiqué précédemment (cf. V.2.i.c), les industriels envisagés pour de la récupération de chaleur dans le réseau de chaleur dunkerquois ont également été analysés. Il s'agit d'**Aluminium Dunkerque** (aussi appelé Rio Tinto), de **EDF pour sa centrale nucléaire et le terminal méthanier**, ou encore d'**Innocold pour la production de froid**, créé à l'initiative de la CUD, de l'Université du Littoral Côte d'Opale et de Dunkerque LNG.

Objectif quantitatif : Objectif de ne pas perdre d'argent

Il nous semble intéressant qu'un des objectifs économiques des producteurs de chaleur fatale n'est pas de maximiser ses profits, mais plutôt de ne pas perdre d'argent par rapport à un fonctionnement sans récupération de chaleur fatale. La rémunération liée à la récupération de chaleur sert alors à compenser des investissements supplémentaires liés à la récupération de chaleur. Le responsable de l'environnement et des risques technologiques à ArcelorMittal explique : « **on cherchait à ne rien gagner dans l'affaire, mais bon, à ne pas perdre. C'est-à-dire que l'investissement supplémentaire lié à la partie chauffage, à la fois on ne le payait pas et on ne profitait pas du bénéfice de la récupération de chaleur. On voulait se faire payer les coûts de maintenance de l'installation en quelques sortes** » (Entretien avec le responsable de l'environnement et des risques technologiques – ArcelorMittal Dunkerque – 02/02/2015) (Hampikian 2017, 139-40).

La couche économique étant toujours en cours de développement, nous n'avons pas modélisé cette contrainte. Cependant, voici comment nous pourrions l'imaginer. Il s'agit de minimiser, en valeur absolue, la différence entre le bilan précédent indiqué et le nouveau bilan calculé et prenant en compte les investissements.

$$\begin{aligned} & \text{def minimize_economic_lost}(self, \text{economic_balance}): \\ & \quad \text{minimize} (|\text{economic_balance} - \text{new_economic_balance}_{\text{producer}}|) \end{aligned}$$

Objectif non quantitatif : Objectif de s'inscrire dans une dynamique territoriale

Le choix de s'engager ou non dans un projet dépasse le cadre technico-économique, comme le montre cet objectif que nous n'avons donc pas modélisé. En effet, le producteur de chaleur fatale accepte en partie de valoriser sa chaleur dans l'idée de « s'inscrire dans une dynamique territoriale » comme l'explique (Hampikian 2017, 138-41) : « Si l'hypothèse d'un **intérêt** financier semble difficilement soutenable, celles de la recherche d'une efficacité énergétique et de la volonté de s'inscrire dans une dynamique partenariale avec les acteurs du territoire sur les questions environnementales sont corroborées par davantage d'éléments empiriques ». Un assistant parlementaire de Michel Delebarre, ancien maire de Dunkerque et président de la CUD, complète : « *L'industriel y voyait un intérêt. En tant qu'acteur du territoire c'était un bon moyen de s'intégrer aussi* » (Entretien avec un assistant parlementaire de Michel Delebarre – 15/12/2015).

Contrainte portée (subie) quantitative : Contrainte d'arrêt temporaire de la production de chaleur

Une contrainte imposée par l'acteur industriel est le fonctionnement de l'usine, qui impacte donc la courbe de production de chaleur. Un arrêt de la production, lié à un problème technique, une maintenance, un incident, arrête également la production de chaleur. Ainsi, un responsable opérationnel chez ArcelorMittal explique : « *On est quand même très tributaire de la marche de la chaîne qui est quand même un sacré process* ». Il explique par ailleurs : « *On a une casse chez nous, eux ils **doivent** suivre et puis c'est tout. Ils redémarrent leur chaudière au fioul s'il faut, et on redémarrera quand on pourra redémarrer. On n'a pas trop de contrainte à ce niveau-là, on ne s'en est pas donnée. C'est eux qui doivent s'adapter à nous* » (Entretien avec un responsable opérationnel – ArcelorMittal – 16/04/2015) (Hampikian 2017, 140; 149)

Nous proposons d'ajouter la contrainte, nommée *add_temporary_stop*¹⁰⁶ et présentée ci-dessous, mettant pendant un temps donné la production à zéro. Cette contrainte étant portée par l'acteur, elle sera facilement identifiable comme une contrainte liée à la production. Dans le cadre d'une maintenance nécessaire à l'industriel, le temps de la maintenance pourrait être négocié. Par exemple, cette maintenance pourrait être réalisée en deux fois pour permettre d'assurer un service minimum au gestionnaire de réseau, même s'il est discontinu, sachant que, si elle est anticipée, il est possible de minimiser l'impact d'une coupure de chaleur pour les consommateurs, notamment en surchauffant avant la coupure.

$$\text{def } add_temporary_stop \left(\begin{array}{l} \text{time, start = 'YYYY - MM - DD HH : MM : SS',} \\ \text{end = 'YYYY - MM - DD HH : MM : SS',} \\ \text{cst_production_unit_list = None} \end{array} \right)$$

Si *cst_production_unit_list* :

$\forall production_unit$ dans *cst_production_unit_list* :

$p_{production_unit}[t] = 0$ pour $t \in [start, end]$

Sinon :

$\forall production_unit$ dans *operated_unit_list* :

$p_{production_unit}[t] = 0$ pour $t \in [start, end]$

La fonction pourrait être utilisée comme suit dans un cas d'étude :

$$\text{Producer.add_temporary_stop} \left(\begin{array}{l} \text{time, start = '2018-06-01 02:00:00',} \\ \text{end = '2018-06-01 06:00:00'} \\ \text{cst_operated_unit_list = [production_1]} \end{array} \right)$$

¹⁰⁶ Le code est disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/actor/operator_actors/producer_actors.py.

Dans ce cadre, le producteur arrêtera la *production_1* entre 2h00 et 6h00 le 1^{er} juin 2018.

Contrainte portée non quantitative : Contraintes d'accès aux installations pour la maintenance liée au fonctionnement de l'usine

Cette contrainte est imposée par le producteur et subie par le chargé de maintenance. Le producteur impose au chargé de maintenance de s'adapter au fonctionnement de l'usine. (Hampikian 2017, 149) explique : « En outre, la maintenance est **contrainte** par l'organisation du travail chez l'industriel et non par celle d'EGL [le gestionnaire de réseau de chaleur] : les plages de maintenance doivent concorder avec les mises en arrêt d'exploitation des chaînes d'agglomération. L'idée générale qui guide leur répartition est celle d'une incidence minimale de la récupération de chaleur sur les processus du sidérurgiste. Ainsi, les agents d'EGL se voient contraints de travailler en temps réduits, parfois mal calibrés et à des périodes qu'ils n'ont pas choisies, selon des contraintes qu'ils ne remettent toutefois pas en cause : « *on ne peut pas arriver et donner des contraintes. C'est à dire qu'on vit avec l'industriel* » (Responsable des grands projets Dalkia Nord, s'exprimant aux Assises européennes de la transition énergétique, 26/01/2016) ». Cette contrainte est appliquée directement sur un autre acteur du SELBC, et non sur le système technique. Nous n'avons donc pas modélisé cette contrainte dans l'outil.

Il est intéressant de noter que des contraintes liées à l'accès aux installations sont également présentes dans le cadre du SELBC au Val d'Europe (cf. Annexe G). Dans ce cas, le gestionnaire de réseau ne peut pas accéder aux installations, dont il n'assure donc pas la maintenance, pour des raisons de sécurité. Ce sont donc des contraintes fortes à identifier dans le cadre de la conception de ce type de SELBC.

Contrainte non quantitative : Contrainte de se retirer du projet

Le producteur, comme tout acteur du projet, peut décider de se retirer du projet. Dans le cadre du projet de valorisation de chaleur, cette contrainte est explicitée par le producteur dans le cadre d'un courrier¹⁰⁷ « adressé au président du SICURD (Michel Delebarre à l'époque) par le directeur du site d'ArcelorMittal : « Nous vous rappelons que nous considérons que cette garantie [céder pour l'euro symbolique une partie des installations] est **déterminante** de notre engagement. En outre, nous souhaitons vous informer que l'absence d'accord exprès de votre part dans les meilleurs délais pourrait compromettre la réalisation du projet ». Nous n'avons pas travaillé sur la modélisation de ce type de contraintes.

V.3.ii.d Synthèse pour les acteurs opérateurs

Le Tableau 8 résume les contraintes et objectifs identifiés pour les acteurs opérateurs.

¹⁰⁷ Il est à noter que cet extrait provient d'un extrait de « littérature grise » dont nous avons mentionné l'intérêt précédemment pour pouvoir comparer les discours des acteurs avec les écrits disponibles.

Type de la raison influente	Nom de la raison influente	Nom de la méthode associée dans l'outil OMEGAlpes (si existante)
Consommateur		
Contrainte quantitative portée	Contrainte d'une consommation d'énergie continue	<i>add_power_consumption_minimum</i>
Gestionnaire réseau		
Objectif quantitatif	Objectif de récupérer de la chaleur & maximiser la récupération de chaleur	<i>minimize_production</i>
Objectif non quantitatif	Minimiser la dépendance à la production et les impacts d'un arrêt de la production de chaleur fatale	
Contrainte quantitative portée	S'imposer un mix énergétique basé sur au moins 50% d'EnR&R	<i>add_RR_energy_rate_minimum_over_the_study</i> <i>add_RR_energy_rate_minimum_at_each_time_step</i>
Producteur		
Objectif quantitatif	Objectif de ne pas perdre d'argent	
Objectif non quantitatif	Objectif de s'inscrire dans une dynamique territoriale	
Contrainte quantitative portée/subie	Contrainte d'arrêt temporaire de la production de chaleur	<i>add_temporary_stop</i>
Contrainte quantitative non portée	Contraintes d'accès aux installations pour la maintenance liée au fonctionnement de l'usine	
Contrainte non quantitative	Contrainte de se retirer du projet	

Tableau 8 : Synthèse des contraintes et objectifs identifiés pour les acteurs opérateurs | Source : Auteure

V.3.iii Acteurs régulateurs

Nous avons mis en évidence deux types d'acteurs régulateurs : les autorités extérieures au projet (V.3.iii.a) et les autorités locales (V.3.iii.b).

V.3.iii.a Autorités extérieures au projet

Plusieurs actants (humains et non humains) régulateurs extérieurs au projet sont identifiés dans le projet de valorisation de chaleur de Dunkerque. Nous avons identifié une personne morale : la **Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL)**, qui fait partie des services déconcentrés de l'État. Nous avons également identifié des réglementations européennes

et françaises concernant la « **valorisation électrique et thermique des déchets ménagers** » et la **taxation des réseaux de chaleur en fonction de mix énergétique**.

Contrainte portée quantitative : Taux de TVA pour les réseaux de chaleur

La réglementation française impose deux niveaux de TVA en fonction du mix énergétique du réseau de chaleur fatal. Ainsi, (Hampikian 2017, 142) explique : « Une **réglementation** découlant des lois Grenelle permet en effet l'application d'un taux de TVA largement réduit, passant de 19,6% à 5,5% pour la vente d'une chaleur distribuée par un réseau de chauffage approvisionné au moins pour moitié par des ENR&R » Depuis 2014, le taux de TVA à 19,6% est passé à 20%.

La couche économique étant toujours en cours de développement, nous n'avons pas modélisé cette contrainte. Cependant, cette contrainte pourrait être ajoutée en lien avec le calcul du taux d'énergies renouvelables et de récupération présenté lors de la contrainte du gestionnaire du réseau de chaleur (cf. V.3.ii.b). Il faudrait également pouvoir faire le lien avec le reste du réseau de chaleur, le taux de TVA s'appliquant sur l'ensemble du réseau.

Contrainte portée quantitative : Taux maximum de diffusion des poussières

Des contraintes de taux de diffusion des poussières sont identifiées dans le projet, bien que les taux maximaux ne soient pas explicités. Ainsi (Hampikian 2017, 142) écrit que « leur [ArcelorMittal] production en grande quantité et leur diffusion dans l'atmosphère pose des problèmes environnementaux au sujet desquels l'entreprise fait l'objet de remontrances régulières de la part de la DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), antenne régionale des services de l'État ». Cette contrainte n'est donc pas respectée par l'industriel, mais elle est bien portée par les acteurs régulateurs.

D'un point de vue modélisation, il faut tout d'abord ajouter aux unités de production une variable proportionnelle à la production d'énergie, par exemple la quantité de poussière produite. Ensuite, il faut ajouter une contrainte associée à l'acteur régulateur, qui peut s'appliquer sur une ou plusieurs unités. La contrainte des poussières étant assez spécifique à ce projet, nous avons développé une contrainte plus générique pour les particules *add_particle_emission_maximum*¹⁰⁸. Le taux maximal de particules peut être constant ou évoluer selon le pas de temps :

$$\text{def } add_particle_emission_maximum(\text{self}, \text{time}, \text{particle_max}, \text{cst_production_list}) \\ \sum_{\text{prod} \in \text{cst_production_list}} \sum_t \text{particle_emission}_{\text{prod}}[t] \leq \text{particle_max}$$

¹⁰⁸ Le code est disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/blob/master/omegalpes/actor/regulator_actors/regulator_actors.py.

La fonction pourrait être utilisée comme suit dans un cas d'étude :

$$DREAL.add_particle_emission_maximum \left(time, particle_max = 100, \right. \\ \left. cst_production_list = [indus_1, indus_2] \right)$$

Objectif quantitatif : Développer la valorisation de chaleur issue des déchets

Nous avons choisi de restreindre le modèle des acteurs régulateurs à des contraintes, et donc de ne pas modéliser leurs objectifs (cf. IV.2.v). En effet, nous considérons que les objectifs des acteurs régulateurs n'influencent pas directement la forme du SELBC, mais que ce sont les réglementations qui en découlent. Notre analyse nous a permis d'identifier des objectifs. Ces objectifs sont bien traduits en réglementations, comme présenté ici.

L'objectif présenté ici est le « développement de la valorisation de chaleur pour la gestion des déchets ». Cet objectif est identifié par (Hampikian 2017, 168) qui explique : « Un tel système est **encouragé par** la puissance publique au travers d'une réduction de la **Taxe Générale sur les Activités Polluantes** qui s'applique aux incinérateurs. Les taux sont fixés de telle manière qu'un abaissement de cette taxe en raison d'une valorisation énergétique est difficilement réalisable sans cogénération, et donc avec la seule production d'électricité. En outre, pour les réseaux de chaleur, la connexion à un UIOM [Unité d'Incinération des Ordures Ménagères] permet d'obtenir aisément le seuil de 50% d'ENR&R, catégorie à laquelle une telle chaleur appartient **réglementairement**, qui garantit un abattement de TVA. Les incitations existent donc dans les deux sens pour encourager la transformation des déchets en chaleur ». Ainsi l'objectif de développer la valorisation de chaleur issue des déchets peut être traduit en deux contraintes : le calcul du taux de la Taxe Générale sur les Activités Polluantes et le calcul du taux de la TVA.

V.3.iii.b Autorités locales

Plusieurs autorités locales sont également identifiées :

- **Le Syndicat Intercommunal de Chauffage Urbain de la Région Dunkerquoise (SICURD)** qui regroupe au départ trois communes : Dunkerque, Saint-Pol-sur-Mer et Grande-Synthe. La commune de Grande-Synthe se retire rapidement après une étude indiquant des difficultés à étendre le réseau de chaleur sur la commune. Le syndicat reste alors composé de Dunkerque et Saint-Pol-sur-Mer, qui fusionnent en 2011, dissolvant alors le syndicat.
- **La ville de Dunkerque**, collectivité locale, qui ne sera en charge du projet qu'entre 2011 et 2015.
- **La Communauté Urbaine de Dunkerque (CUD)**, collectivité locale, qui est en charge du projet à partir de 2015, suite à la promulgation de la loi de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (MAPTAM) redéfinissant les compétences des communautés urbaines.

Ces autorités locales ont également été identifiées dans un autre rôle : le rôle de développeur. En effet, elles ont assuré ce double rôle dans le cadre du projet, ayant alors des objectifs et des contraintes associés au rôle différents.

Il nous faut également mentionner Michel Delebarre, cité à plusieurs reprises, qui a été maire de la ville de Dunkerque (1989-2014), président de la communauté urbaine de Dunkerque (1995-2014), président du Syndicat Intercommunal de Chauffage Urbain de la Région Dunkerquoise, et également sénateur (2011-2017).

Des actants non humains sont également identifiés : le « **schéma d'environnement industriel**, qui fixe les conditions d'aménagement de la zone industrielle en accord avec des prérogatives environnementales, est construit en concertation avec les entreprises » (Hampikian 2017, 139) en 1993, et le **Plan d'Aménagement et de Développement Durable (PADD)**.

Objectif non quantitatif : Garantir un service public compétitif

Dans le cadre du réseau de chaleur, la collectivité territoriale compétente vise à assurer un service public compétitif. Dans les faits, cela se traduit par un avenant au contrat de concession du réseau : c'est pourquoi cet objectif est associé à l'acteur régulateur. Ainsi, (Hampikian 2017, 155) explique : « Cependant, alors que la solution du réseau avait été pensée pendant la crise pétrolière qui avait fait plus que doubler le prix moyen des énergies entre 1980 et 1985, ce dernier s'effondre en 1986. Le réseau n'est donc plus compétitif en l'état et l'on **décide** d'introduire en 1987 un avenant au **contrat de concession** qui autorise la mise en place d'une tarification « conjoncturelle », c'est-à-dire moins élevée que la tarification « normale » prévue par le contrat initial. (...) Dans les faits, il s'agit d'augmenter dans la formule de calcul du tarif de la chaleur la part prise par les énergies fossiles, afin de ramener le tarif du réseau plus proche de celui de ces dernières, les différents taux étant décidés d'un commun accord entre la collectivité et le concessionnaire, notamment afin de garantir une compétitivité en comparaison d'une solution individuelle au gaz ». À l'instar des objectifs présentés précédemment pour les acteurs régulateurs, cet objectif se traduisant en avenant est à considérer comme une contrainte. La contrainte associée nous semble chiffrable et donc quantitative. Liée à la couche économique, et de plus s'agissant d'une contrainte assez spécifique, nous n'avons pas modélisé cette contrainte.

Contrainte portée non quantitative : Valider des investissements sur le réseau de chaleur

Il est important de noter que le réseau de chaleur étant en délégation de service public, l'autorité ayant la compétence énergie (commune avec une délégation au syndicat avant la loi MAPTAM de 2014, puis communauté urbaine après 2014) valide les investissements. Ainsi, (Hampikian 2017, 142) explique : « le SICURD accueille cette proposition [la valorisation de chaleur fatale d'ArcelorMittal] de manière positive et donne son aval, **nécessaire** au lancement de l'opération : « *on a adhéré et puis on a donné notre accord, surtout que nous on participe [aux investissements] à hauteur de 50%. Parce que nous, enfin c'est Dalkia qui avance les fonds, mais quelque part, nous on se doit d'être garant des investissements qu'ils font, par rapport à la collectivité* » (Entretien avec le directeur du service énergie de la ville de Dunkerque – 15/04/2015) ». Nous n'avons pas modélisé cette contrainte, que nous considérons comme non quantitative.

V.3.iii.c Synthèse pour les acteurs régulateurs

Le Tableau 9 résume les contraintes et objectifs identifiés pour les acteurs régulateurs.

Type de la raison influente	Nom de la raison influente	Nom de la méthode associée dans l'outil OMEGAlpes (si existante)
Autorités extérieures au projet		
Contrainte portée quantitative	Taux de TVA pour les réseaux de chaleur	
Contrainte portée quantitative	Taux de diffusion des poussières	<i>add_particle_emission_maximum</i>
Objectif quantitatif	Développer la valorisation de chaleur issue des déchets	
Autorités locales		
Objectif non quantitatif	Garantir un service public compétitif	
Contrainte portée non quantitative	Valide des investissements sur le réseau de chaleur	

Tableau 9 : Synthèse des contraintes et objectifs identifiés pour les acteurs opérateurs | Source : Auteure

V.3.iv Acteurs indirectement engagés dans la conception et dans le fonctionnement SELBC

Plusieurs acteurs considérés comme indirectement engagés dans la conception et dans le fonctionnement SELBC (cf. I.3.iii.c) ont été identifiés dans le cadre de notre analyse :

- le chargé de maintenance : rôle assuré par **EGL**.
- le concepteur solution : **un bureau d'étude** dont le nom n'est pas mentionné.
- les financeurs : **Dalkia** et la **collectivité** pour le réseau et les installations ; **ArcelorMittal** en cas de désengagement, comme nous le présenterons ci-après ; **l'ADEME** pour les études et le Fonds Chaleur ; et enfin le **Conseil Régional du Nord-Pas-de-Calais** pour une étude.
- les prescripteurs : le **pôle de compétitivité Énergie 2020** réfléchissant à la mise en place d'un « fond de garantie » national comme une assurance pour les projets qui échouent, le **Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles** source des échanges entre collectivités et industriels sur la qualité de l'air ; le **Secrétariat Permanent pour la Prévention de la Pollution et des Risques Industriels (S3PI)** rassemblant des collectivités, des industriels, des riverains... sur des thématiques liées à l'air ou aux rejets, par exemple ; ou encore l'association **ECOPAL** faisant la promotion de l'écologie industrielle.
- les propriétaires : les collectivités pour le réseau de chaleur ; ArcelorMittal pour les unités de production.
- les riverains : habitations appartenant aux communes de Saint Pol et de Grande-Synthe qui reçoivent ses poussières, parfois de manière spectaculaire.

Dans le chapitre I (cf. I.3.iii.c), nous avons indiqué que ces acteurs étaient considérés comme non concernés ou indirectement engagés dans la conception ou dans l'opération des SELBC, car ils suivent ou répondent aux demandes des parties prenantes. Lors de notre analyse, nous avons pu confirmer cette affirmation, du moins dans ce cas d'étude.

V.3.v Éléments naturels

Enfin, les éléments naturels sont peu mis en avant dans le cadre de ce projet. Nous avons tout de même pu mettre en évidence une contrainte liée à la disposition territoriale des installations. En effet, (Hampikian 2017, 177) note : « toutefois, malgré cette volonté [valoriser du froid issu du terminal méthanier], la réservation d'un espace pour ces activités **se heurte** à la réalité physique du territoire, tel qu'il est aménagé. Le terminal se trouve en effet en bord de mer, à l'écart des zones industrielles existantes. *« Quand on regarde géographiquement comment ça se passe, globalement, soit il faut tirer un tube qui fait 3 ou 4 km et ça, c'est économiquement pas rentable parce que j'ai beaucoup de pertes en ligne [...] et puis un tube cryogénique, ça coûte bien plus cher qu'un tube traditionnel. Ou alors, il faudrait construire des digues [...] mais alors là, c'est plus un projet à quelques centaines de millions d'euros, c'est tout de suite beaucoup plus cher, et en termes d'exploitation et d'amortissement, c'est plus du tout rentable pour le client final. Et puis ici, c'est des zones de nidification, c'est des zones protégées »* (Entretien avec un chargé de mission de l'institut Innocold – 15/04/2015) ». On peut noter que cette contrainte peut être dépassée par des transformations techniques, mais qui ont un certain coût. A l'instar des autres contraintes transformant l'assemblage, nous ne la modélisons pas en tant que telle.

V.4 Limites de l'analyse et de la modélisation associée

Il nous semble à présent essentiel de nous interroger sur la méthode d'analyse que nous avons présentée dans ce chapitre (V.4.i), ainsi que sur la modélisation associée (V.4.ii), et d'en présenter certaines limites.

V.4.i Retour sur la méthode d'analyse

V.4.i.a Retour sur nos hypothèses

Au début de ce chapitre, nous avons fait l'hypothèse **qu'il existe et qu'il est possible d'identifier des raisons influentes et de les associer à des parties prenantes types**. Cette hypothèse principale nous a amenée à faire plusieurs sous-hypothèses :

- la première est qu'il est possible d'identifier les raisons influentes via un corpus de texte décrivant les SELBC,
- la seconde est qu'il existe des raisons influentes de type objectif et contrainte, et cela dans l'idée que ce travail puisse aboutir à la production d'une bibliothèque de modèles comme présenté dans le chapitre précédent,
- la troisième est que les raisons influentes sont portées différemment par les acteurs : elles peuvent être communes ou spécifiques.

L'application de la méthodologie sur le cas de valorisation de chaleur fatale nous permet de valider ces hypothèses.

V.4.i.b Une cohérence dans les types d'acteurs proposés

Pour identifier les acteurs, nous nous sommes basée sur la typologie d'acteurs proposée dans le chapitre I (cf. I.3.iii.b). Les acteurs identifiés ont pu être catégorisés selon cette typologie. En revanche, il nous semblait nécessaire de préciser que la catégorie proposée avait été complétée par nos analyses. En effet, les deux acteurs prescripteurs et éléments naturels en sont issus. Ainsi, cette méthodologie permet de valider notre typologie d'acteurs, mais également de la compléter.

V.4.i.c Des objets d'études limités

Nous avons choisi de travailler, dans le cadre de cette thèse, sur deux types de SELBC : la récupération de chaleur fatale et l'autoconsommation collective électrique. De nombreux autres types de SELBC pourraient donc être étudiés, que ce soit sur d'autres ressources comme la biomasse, l'éolien, ou d'autres vecteurs énergétiques comme le gaz naturel. L'analyse des SELBC que nous proposons n'est donc pas exhaustive.

Nous aurions également pu analyser d'autres projets basés sur les mêmes types de SELBC. Nous aurions sûrement identifié des acteurs différents, et surtout des objectifs et des contraintes différentes. En effet, chaque terrain a ses spécificités. De manière générale, une enquête et une analyse spécifique seraient donc le plus adaptées pour connaître les acteurs, ainsi que leurs raisons influentes.

Nous n'avons pas cherché à comparer les résultats obtenus pour deux types de SELBC similaires, ce qui nous semble un travail à poursuivre. Nous n'avons donc pas à ce jour déterminé des contraintes et objectifs communs ou spécifiques pour un type de SELBC. Il aurait également fallu comparer un plus grand nombre de SELBC du même type. Par ailleurs, il est à noter que les cas d'études sont localisés en France, ce qui limite leur généralité. Il serait donc intéressant d'étudier des cas d'étude situés dans d'autres pays.

V.4.i.d Application de la méthodologie sur des rapports de thèses

Nous avons fait le choix de travailler à partir de rapports de thèses pour des raisons temporelles et d'accessibilité aux matériaux (cf. V.1.iii et V.2.ii). L'analyse nous a montré qu'il était possible d'y identifier des raisons influentes. Notre méthodologie peut également être utilisée pour des entretiens issus d'enquêtes qualitatives, comme cela est généralement fait dans les études en sciences sociales.

V.4.i.e Identifier uniquement ce qui est indiqué par les acteurs

Notre méthodologie d'analyse ne met en évidence que ce qui est explicitement dit par les acteurs (chercheurs inclus). En effet, la méthodologie présentée propose de se baser uniquement sur des rapports de thèses ou des entretiens. L'intérêt de travailler à partir de rapports de thèses est que certains points plus implicites ont pu être mis en évidence. Dans les deux cas, nous pouvons donc supposer qu'il existe des raisons influentes non explicitées par les acteurs que notre méthodologie ne permet pas d'identifier.

D'autres méthodes développées en sciences sociales auraient pu être utilisées pour compléter ces analyses. Nous pourrions en citer quelques-unes rencontrées dans le cadre de notre recherche : les objets intermédiaires, qui permettent de suivre les acteurs – et donc de les analyser – au travers du parcours d'un objet utilisé par plusieurs acteurs (Vinck 2009) ; ou encore la réalisation de transects, qui permettent d'étudier une zone ou un objet mouvant en confrontant les acteurs à des représentations graphiques du terrain afin de les amener à s'exprimer dessus. Nous avons fait le choix de ne tester qu'une méthode : l'enjeu premier était alors pour nous d'arriver à identifier des contraintes et des objectifs liés aux acteurs dans le but de les modéliser.

V.4.ii Retour sur la modélisation issue de l'analyse

La méthodologie d'analyse permet d'identifier plus d'informations que ce que nous pouvons modéliser. Le modèle d'acteur proposé est en effet plus restrictif car (cf. IV.2) :

- il propose de ne modéliser que les parties prenantes, alors que nous avons pu identifier d'autres types d'acteurs (V.4.ii.a),
- il ne propose pas de modéliser les raisons influentes qui transforment l'assemblage (V.4.ii.b),
- il est restreint aux objectifs et contraintes quantitatifs, alors que nous avons aussi identifié des objectifs et contraintes qualitatives (V.4.ii.d).
- il est restreint aux objectifs et contraintes, alors que nous avons pu identifier d'autres raisons influentes (V.4.ii.d),

La bibliothèque de modèles vise à faciliter la modélisation en proposant des contraintes et objectifs associés à des acteurs pré-modélisés. Le caractère open source de l'outil permet aux modélisateurs de compléter la bibliothèque de modèles, que ce soit pour les acteurs ou pour les raisons influentes.

V.4.ii.a Les acteurs non modélisés

Dans le chapitre I (cf. I.3.iii.c), nous avons proposé une synthèse des acteurs des SELBC dans laquelle nous différencions les « parties prenantes » du SELBC des acteurs indirectement engagés dans la conception et dans le fonctionnement des SELBC et des éléments naturels. Nous considérons alors que les contraintes et les objectifs de ces acteurs étaient en fait portés par les parties prenantes. Notre analyse nous a amenée à identifier des acteurs que nous ne considérons pas comme des parties prenantes. Cependant, nous avons remarqué, au travers de notre analyse, que leur rôle peut également les conduire à ajouter des contraintes au SELBC, nous amenant à nous interroger sur notre première distinction.

En effet, l'analyse du projet de valorisation de chaleur au Val d'Europe (cf. Annexe G)c) permet d'identifier que le chargé de maintenance porte la contrainte d'arrêter le fonctionnement de la machine pour pouvoir en réaliser la maintenance. L'arrêt de production de chaleur limite l'intérêt des hôtels à recourir à cette chaleur, réduisant le nombre de consommateurs possibles et donc l'assemblage socio-énergétique associé au SELBC.

V.4.ii.b Les raisons influentes transformant l'assemblage non modélisées

Comme nous l'avons indiqué à plusieurs reprises, les contraintes et les objectifs transformant l'assemblage ne sont pas modélisés au sein de l'outil. C'est en fait par le choix des briques modélisées que ces contraintes et objectifs sont pris en compte dans le modèle.

V.4.ii.c Les raisons influentes qualitatives non modélisées

Des raisons qualitatives peuvent avoir un rôle très important dans la décision des acteurs, c'est pourquoi il nous semble nécessaire de les identifier comme nous l'avons fait dans ce chapitre. Dans le cadre d'un projet, il serait également nécessaire de pouvoir les porter à connaissance des parties prenantes. Bien que nous n'ayons pas investigué cette démarche dans cette thèse, préférant ne modéliser que ce qui est de l'ordre du quantitatif, il pourrait être envisagé de chercher à modéliser les contraintes qualitatives, à l'instar de certains chercheurs tels que (Döll, Döll, et Bots 2013), qui visent à proposer un modèle semi-quantitatif.

V.4.ii.d Les autres raisons influentes non modélisées

Nous avons fait le choix de ne modéliser que les contraintes et les objectifs. Cependant, lors de notre analyse, nous avons pu identifier des raisons influentes qui ne sont ni des contraintes, ni des objectifs. Ces raisons influentes peuvent jouer un rôle essentiel dans la forme du SELBC, ce qui montre encore une fois que notre modèle ne permet pas de tout prendre en compte, et qu'il faut donc être prudent vis-à-vis des solutions identifiées.

Un exemple de raison influente jouant sur la forme du SELBC, mais qui n'est ni une contrainte, ni un objectif, est la répartition de la propriété des installations. (Hampikian 2017, 146) explique : « les représentants de l'industriel font connaître plusieurs réticences à s'engager dans un projet commun avec EGL. Le premier problème soulevé est à nouveau d'ordre juridique : l'industriel souhaite lever le flou sur la répartition de la propriété des investissements ». En effet, « la question de la propriété des matériels objets de ces investissements pose problème aux juristes de la ville de Dunkerque : étant financés en partie par l'industriel, ils ne peuvent être traités comme des « biens de retour » appartenant à l'autorité concédante, c'est-à-dire les communes représentées par le SICURD [Syndicat Intercommunal de Chauffage Urbain de la Région Dunkerquoise], comme c'est en général le cas pour les installations liées aux infrastructures dont les collectivités sont propriétaires ». Cette répartition va être un point central des discussions, mais en revanche, ce point n'est pas modélisable dans l'outil que nous proposons.

Conclusion du chapitre V

Ce chapitre vise à identifier les raisons influentes des parties prenantes d'un SELBC pour en proposer une modélisation dans une bibliothèque de modèles d'un métamodèle d'optimisation. Les sciences sociales s'intéressant à l'étude des acteurs, nous nous sommes basée sur des méthodologies utilisées dans ces disciplines pour identifier les raisons influentes des parties prenantes. Après une présentation rapide des méthodologies de recherche et d'analyses en sciences sociales, nous focalisant sur les enquêtes qualitatives et leur analyse, nous avons proposé une méthodologie pour l'identification de raisons influentes, et plus précisément de contraintes et d'objectifs associés à des parties prenantes

types. Cette méthodologie se base sur une analyse de rapports de thèses, et possiblement d'entretiens, étudiant des SELBC, accompagnée par un logiciel d'analyse qualitative de type Nvivo. L'analyse vise alors à identifier dans le texte les acteurs du projet, leurs raisons influentes et, si possible, leurs contraintes et objectifs.

Cette méthodologie a été appliquée sur le cas d'étude de valorisation de chaleur fatale à Dunkerque présenté dans ce chapitre, ainsi que sur trois autres SELBC de valorisation de chaleur fatale ou d'autoconsommation collective présentés en annexe (cf. Annexe E, Annexe F, Annexe G). Les résultats de notre analyse, et plus précisément les contraintes et les objectifs par type d'acteurs, ont été modélisés dans la bibliothèque de modèles OMEGAAlpes, lorsque cela était possible. Enfin, une dernière partie permet de revenir sur les limites de cette analyse et de ces modèles.

La modélisation proposée dans la bibliothèque OMEGAAlpes a pour but d'être appliquée sur des projets de conception de SELBC. Nous présentons dans le chapitre suivant un cas d'application afin de montrer comment les modèles développés pourraient être appliqués.

CHAPITRE VI

Exemple d'application : SELBC
d'autoconsommation collective

VI.1	DES OUTILS POUR INITIER LE PROJET	183
VI.2	RECUPERATION ET ANONYMISATION DES DONNEES.....	185
VI.3	PRESENTATION DU CAS D'ETUDE ET DES ASSEMBLAGES SOCIO-ENERGETIQUES ETUDIES	186
VI.3.i	<i>Modélisation technique</i>	187
VI.3.ii	<i>Modélisation des acteurs : prosumers et personne morale</i>	188
VI.4	OPTIMISATION ET RESULTATS	191
VI.4.i	<i>Comparaison des résultats obtenus pour l'autoconsommation individuelle et l'autoconsommation collective en fonction de trois objectifs : maximiser le taux d'autoconsommation, maximiser le taux d'autoproduction et maximiser la corrélation entre production et consommation</i>	191
VI.4.ii	<i>Comparaison avec la modélisation imaginaire</i>	193
VI.4.iii	<i>Problème infaisable</i>	193
VI.4.iv	<i>Front de Pareto</i>	194
CONCLUSION DU CHAPITRE VI		195

Chapitre VI. Exemple d'application : SELBC d'autoconsommation collective

La modélisation qui a été réalisée dans la bibliothèque OMEGAlpes a pour but d'être appliquée sur des projets de conception de SELBC. Nous appliquons, dans ce chapitre, la modélisation sur un projet de production photovoltaïque concernant dix logements¹⁰⁹. Le cas d'étude est présenté comme un tutoriel afin que de nouveaux projets puissent s'appuyer sur cette présentation. Nous présentons donc dans un premier temps des outils qui nous semblent appropriés pour réfléchir à un projet d'autoconsommation collective (VI.1). La modélisation d'un projet d'autoconsommation collective nécessite le recours à des données de consommation et de production, c'est pourquoi nous introduisons dans un second temps la démarche de récupération et d'anonymisation des données (VI.2). Ensuite, nous proposons de comparer des projets d'autoconsommation individuelle et un projet d'autoconsommation collective basés sur le même système technique (dix unités de consommation, des panneaux photovoltaïques, des compteurs...). Nous présentons alors succinctement la partie technique et la partie liée aux acteurs du modèle (VI.3), le code étant disponible en open-source. Dans une dernière partie nous optimisons les deux modèles afin de pouvoir les comparer (VI.4). Nous faisons également évoluer les modèles afin de montrer l'intérêt de certaines briques développées et présentées dans le Chapitre III.

Un second cas d'étude sur la récupération de chaleur fatale est présenté en annexe (cf. Annexe I). Ce second cas d'étude a accompagné la construction du métamodeleur OMEGAlpes et du modèle d'acteur, mais il a été réalisé en amont de ces productions. Ainsi la modélisation proposée n'a pas été développée sur le modeleur OMEGAlpes. En revanche, elle permet de présenter une analyse multiacteur pour un projet de valorisation de chaleur fatale.

VI.1 Des outils pour initier le projet

Il nous semblait intéressant, dans un premier temps, de présenter des outils disponibles gratuitement pouvant accompagner le développement de projets d'autoconsommation collective en phase de pré-étude. Ces outils ne sont pas tous disponibles sur l'ensemble du territoire français : nous préciserons donc leur étendue.

Supposons que nous souhaitions développer un projet d'autoconsommation collective à Grenoble. Comme nous l'avons indiqué précédemment, les projets d'autoconsommation collective sont actuellement limités à 1 km de rayon. C'est-à-dire que toutes les sources de production et de consommation doivent se situer au maximum à 2 km les unes des autres. L'outil Calcmaps¹¹⁰ peut aider

¹⁰⁹ Ce cas d'étude reprend en partie l'article « Multi-actor modelling for MILP energy systems optimisation: application to collective self-consumption », appliqué sur trois logements, présenté dans la conférence internationale Building Simulation 2019 (Morriet, Debizet, et Wurtz 2019).

¹¹⁰ CalcMaps, page « Calculateur de rayon de carte », *CalcMaps*, consultée en juillet 2020, <https://www.calcmaps.com/fr/map-radius/>.

à définir le périmètre de l’autoconsommation collective (cf. Figure 78). Pour cela, nous avons tracé deux cercles centrés sur notre habitation. : le cercle A de rayon 1 km (considérant que notre habitation serait au centre, géographiquement parlant, de l’autoconsommation collective) et le cercle B de rayon 2 km (pour définir les producteurs ou consommateurs les plus éloignés, pouvant partager un projet d’autoconsommation collective avec nous). Si nous décidons de partager un projet d’autoconsommation collective avec un bâtiment situé à une extrémité (par exemple le point bleu), il est alors opportun de tracer un nouveau cercle entre notre habitation et ce bâtiment, le cercle C, définissant les prosumers potentiels entre ces deux points extrêmes.

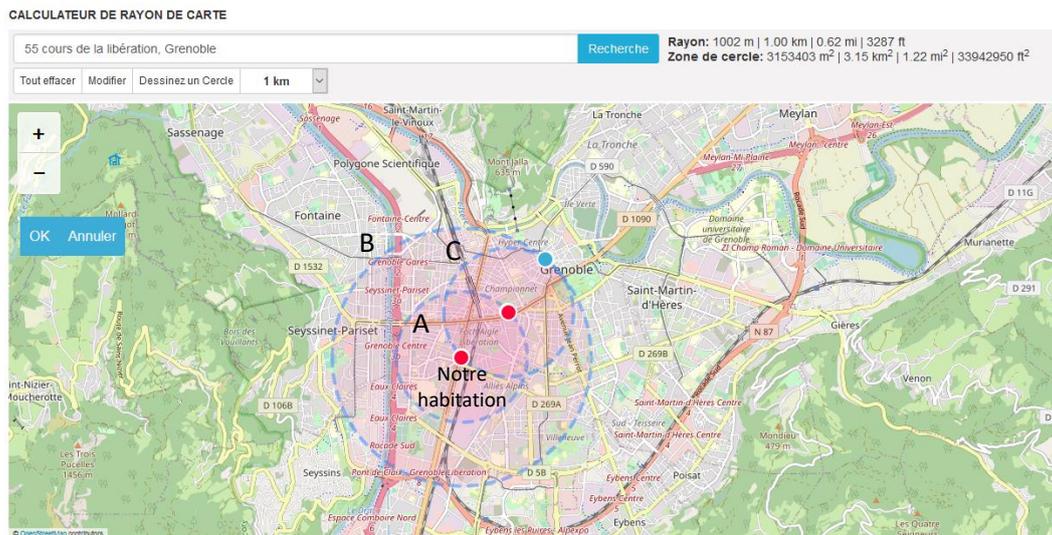


Figure 78 : Identification de la zone géographique pour un projet d'autoconsommation collective | Source : Auteure à partir de la page « Calculateur de rayon de carte »

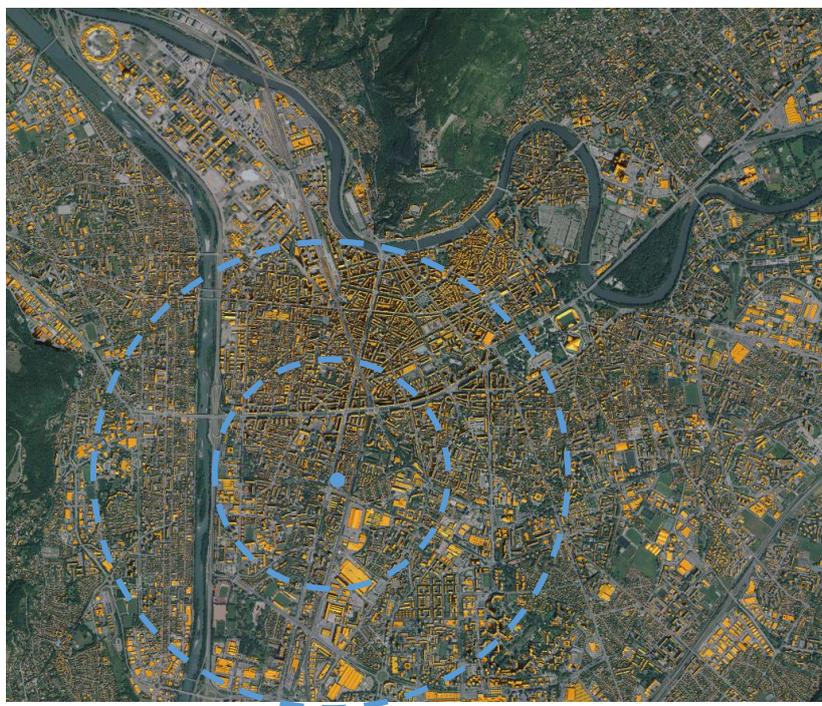


Figure 79 : Identification des bâtiments potentiels à partir du cadastre solaire | Source : Auteure à partir de la page « cadastre solaire »

Une fois la zone géographique délimitée, il peut être intéressant de regarder le potentiel énergétique disponible sur les bâtiments situés dans cette zone. La métropole de Grenoble a fait développer le cadastre solaire MétroSoleil¹¹¹. Nous avons donc regardé le potentiel disponible sur notre bâtiment (cf. Figure 80). Il n'est pas possible de tracer le cercle pour la zone géographique directement sur la carte proposée pour identifier, au sein du cadastre solaire, les bâtiments potentiels. Nous l'avons donc fait *a posteriori* (cf. Figure 79). D'autres cadastres solaires existent en France. Ils sont généralement accessibles via les sites internet de la commune, de la communauté de communes, ou encore du syndicat d'énergies.



Figure 80 : Potentiel solaire et coûts d'installation envisagé pour un bâtiment de la zone | Source : page « Cadastre solaire »

Lorsqu'Enedis est le gestionnaire du réseau local, il est également possible d'estimer un coût de raccordement¹¹². Cependant, la zone étudiée dans cet exemple est gérée par le gestionnaire GreenAlp qui, à notre connaissance, ne propose pas de cette option.

VI.2 Récupération et anonymisation des données

Pour modéliser le cas d'étude, nous avons souhaité travailler à partir de données réelles issues d'un projet d'autoconsommation collective. Pour cela, nous avons établi un formulaire de consentement en cohérence avec la réglementation sur la protection des données (RGPD). Ce formulaire est présenté dans l'Annexe H. Ainsi, nous avons pu récupérer des données de consommation de logements et de production photovoltaïque, que nous utilisons de façon anonyme. Après avoir donné son

¹¹¹ Cythelia, page « Cadastre solaire », consultée le 7 septembre 2020, <https://grenoble-metropole.cadastre-solaire.fr/?mapCenter=|45.20187683128092|5.702033042907715|&mapZoom=15>.

¹¹² Enedis, page « Mes raccordements – Espace Particulier », Enedis, 2019, consultée le 7 septembre 2020, <https://mon-compte-particulier.enedis.fr/raccorder/>.

consentement, les données de consommation du logement sont récupérables, pour tout consommateur possédant un compteur Linky, sur le site d'Enedis¹¹³.

VI.3 Présentation du cas d'étude et des assemblages socio-énergétiques étudiés

Nous considérons à présent dix habitations. Deux possibilités sont envisagées par les habitants¹¹⁴ : chaque habitation installe ses propres panneaux photovoltaïques sur son toit et autoconsomme (cf. Figure 81) ou les habitants décident de développer un projet d'autoconsommation collective (cf. Figure 82).

Les analyses des projets d'autoconsommation collective (cf. Annexe E et Annexe F) nous invitent à considérer les acteurs opérateurs suivants :

- les *prosumers*, dans notre cas les habitants. Le domaine de responsabilité associé correspond aux unités de consommation et au système de production photovoltaïque qui est individuel ou partagé selon le scénario. Dans le cadre de l'autoconsommation collective, les prosumers sont regroupés au sein d'une personne morale. Le domaine de responsabilité associé est alors l'ensemble des unités de production. La personne morale n'en est pas forcément propriétaire mais *a minima* décisionnaire. N'ayant pas modélisé de zones communes, ni d'unités de consommation communes, il nous semble devoir exclure les consommations du domaine de responsabilité de la personne morale, ces dernières n'étant modifiées que par les prosumers eux-mêmes.
- le ou les fournisseurs. Pour simplifier le cas d'étude, nous considérons un unique fournisseur. Le domaine de responsabilité est le réseau d'électricité et le système d'information associé.
- le gestionnaire du réseau d'électricité. Le domaine de responsabilité est également le réseau d'électricité et le système d'information associé.

Les deux représentations ci-dessous permettent de mettre en évidence graphiquement que la représentation de l'assemblage socio-énergétique est intéressante, car bien que les objets techniques soient les mêmes, les assemblages sont différents. La modélisation est réalisée sur 48 heures par pas

¹¹³ Enedis, page « Mes raccordements – Espace Particulier », *Enedis*, 2019, consultée le 7 septembre 2020, <https://mon-compte-particulier.enedis.fr/>.

¹¹⁴ Les notebooks, pour tester les différentes variantes des codes, sont disponibles ici : https://mybinder.org/v2/git/https%3A%2F%2Fgricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr%2Fomegalpes%2Fomegalpes_examples/master. Une fois le dossier téléchargé, sélectionner les dossiers « notebooks » puis « PhD_2021_Lou_Morriet » et sélectionner le notebook à tester.

Le code est également disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_examples/-/tree/master/article_case_study.

de temps de 30 minutes, ce qui correspond au pas de temps des données collectées pour les unités de consommation et pour les unités de production.

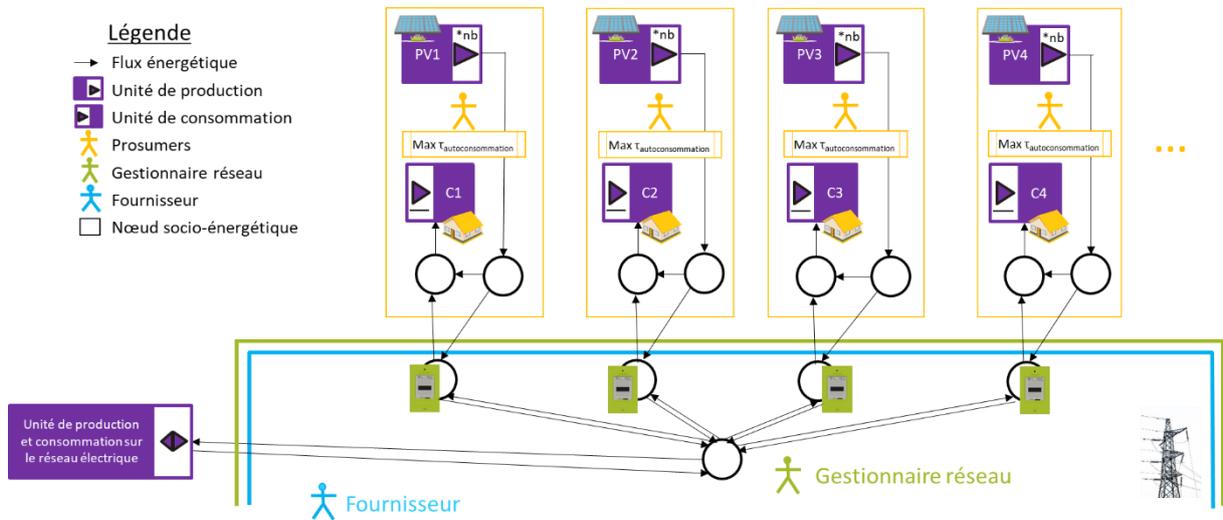


Figure 81 : Représentation de l'assemblage socio-énergétique dans le cadre d'un projet d'autoconsommation individuelle pour les dix habitations | Source : Auteure

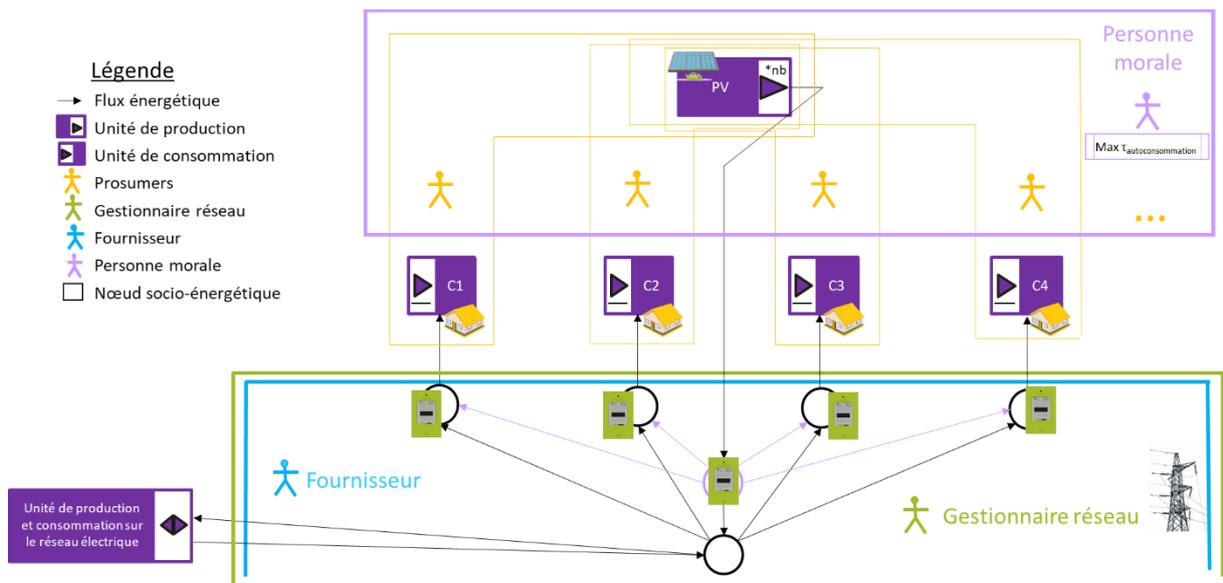


Figure 82 : Représentation de l'assemblage socio-énergétique dans le cadre d'un projet d'autoconsommation collective pour les dix habitations | Source : Auteure

VI.3.i Modélisation technique

Dans les deux cas d'étude, nous avons modélisé les consommations comme des courbes de charges fixes à partir de l'unité de consommation *FixedConsumptionUnit*. Ces courbes de charges sont issues des données collectées pour différents logements. Les dix unités de consommation sont regroupées dans la liste d'unités énergétiques *cons_list* et sont nommées *conso_1*, *conso_2* ... *conso_10*. La Figure 83 représente l'évolution des courbes de charges sur 48 heures entre le 24 et le 26 novembre 2018.

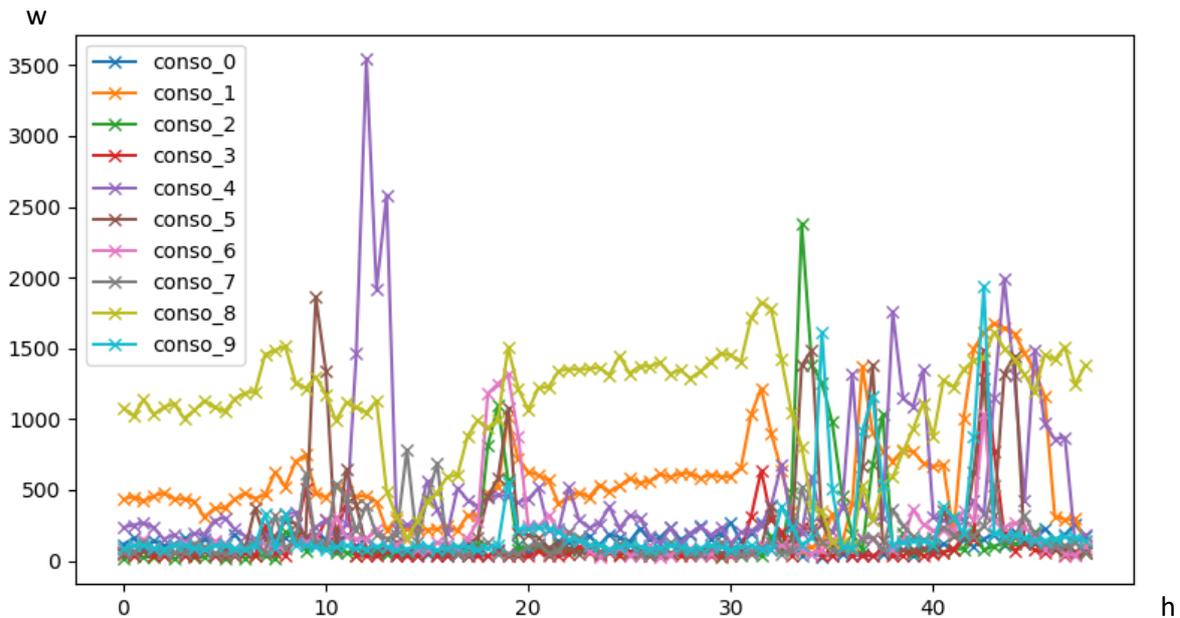


Figure 83 : Courbe de charge pour les 10 unités de consommation sur 48 h | Source : Auteure

Les panneaux photovoltaïques, nommés *pv* dans le code, sont modélisés à l'aide de l'unité *SeveralProductionUnit* qui permet de définir un nombre optimal de modules photovoltaïques en fonction des contraintes et objectifs du problème. Si le paramètre *imaginary* est faux (*False*), alors le nombre de modules doit être entier ; s'il est vrai (*True*), le nombre de modules peut être décimal (cf. III.2). Dans les deux cas, ce nombre doit être supérieur à zéro. La courbe de charge d'un module photovoltaïque est également basée sur les données collectées, que nous avons cette fois-ci normalisées pour obtenir la production pour un module de 250 Wc.

Dans le cas de l'autoconsommation individuelle, le fait de distinguer deux nœuds énergétiques, modélisés à partir de la brique *EnergyNode*, permet de calculer le flux de production autoconsommée (qui correspond également au flux de consommation autoproduite, situé entre les deux nœuds dans le domaine de responsabilité du prosumer).

Le réseau est modélisé par des nœuds énergétiques instanciés à partir de la brique *EnergyNodes*. Sur le schéma, un compteur Linky est représenté pour signifier les points d'injection et les points de soutirage du réseau.

Les productions et consommations extérieures au projet sont modélisées à l'aide de la brique *ReversibleUnit*, nommée *supply*, elle-même composée d'une unité de consommation et d'une unité de production, mais ne pouvant pas produire et consommer en même temps. Nous les avons modélisées afin d'assurer la possibilité d'une fourniture d'électricité au projet et la possibilité d'une réinjection des surplus sur le réseau.

VI.3.ii Modélisation des acteurs : prosumers et personne morale

Nous avons ensuite modélisé la couche acteur. Les *prosumers* et la personne morale, nommés respectivement de *prosumer_1* à *prosumer_10* et *legal_person* dans le code, portent des objectifs et des contraintes. C'est pourquoi nous n'avons pas modélisé ce type d'acteurs. Ils sont modélisés à partir

de l'acteur opérateur *Prosumer*. Dans le premier cas d'étude, 10 *prosumers* sont modélisés. Dans le second cas d'étude, les *prosumers* n'ont pas d'objectifs propres mais en ont via la personne morale que nous modélisons. La personne morale porte en effet l'objectif collectif des *prosumers*.

Chaque *prosumer* peut installer jusqu'à 45 m² de panneaux photovoltaïques sur son toit. Considérant qu'un panneau de 250 Wc mesure 1,5 m², chaque *prosumer* peut installer jusqu'à 30 panneaux photovoltaïques. Pour modéliser cette contrainte, nous utilisons la méthode *add_nb_unit_maximum*.

Les acteurs de type *prosumers* peuvent porter des objectifs différents. Nous avons déjà identifié l'objectif de maximiser la production locale en fonction de la place disponible (cf. Annexe E). D'autres objectifs sont également assez répandus : maximiser le taux d'autoconsommation, maximiser le taux d'autoproduction ou encore maximiser la corrélation entre la production et la consommation à chaque instant. La Commission de Régulation de l'Énergie (CRE) définit le taux d'autoconsommation comme « la part de production autoconsommée », « qui est égale au rapport entre la production autoconsommée et la production totale du site » (cf. équation (12)); et le taux d'autoproduction comme « la part de la consommation du site assurée par la production locale », « qui est égale au rapport entre la consommation autoproduite et la consommation totale du site » (cf. équation (13)) (cf. Figure 84) (CRE 2017). La corrélation entre la production et la consommation est généralement calculée à partir des quantités d'énergies sur une année, mais nous considérons qu'elle doit être calculée à partir des puissances à chaque pas de temps.

$$\tau_{\text{autoconsommation}} = \sum_t \frac{\text{production_autoconsommée}[t]}{\text{production_totale}[t]} \quad (12)$$

$$\tau_{\text{autoproduction}} = \sum_t \frac{\text{consommation_autoproduite}[t]}{\text{consommation_totale}[t]} \quad (13)$$

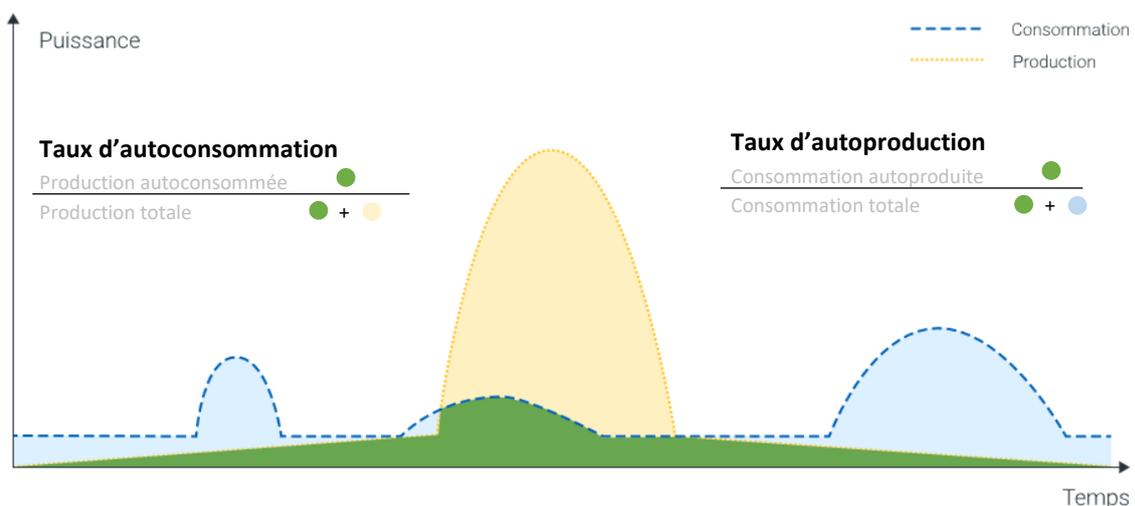


Figure 84 : Représentation graphique des taux d'autoconsommation et d'autoproduction | Source : Auteure à partir de la page « Ce qu'il faut savoir pour comprendre l'autoconsommation »

Comme indiqué dans le chapitre II (cf. II.2.iv), l’outil OMEGAlpes est un outil d’optimisation linéaire. Pour garder une formulation linéaire¹¹⁵, nous avons modélisé l’objectif de maximiser le taux d’autoconsommation, intitulé *maximize_selfconsumption_rate* dans l’outil, par le fait de minimiser la différence entre la production autoconsommée et la production totale, en valeur absolue (cf. équation (14)) ; et l’objectif de maximiser le taux d’autoproduction, intitulé *maximize_selfproduction_rate* dans l’outil, par le fait de minimiser la différence entre la consommation autoproduite et la consommation totale, en valeur absolue (cf. équation (15)) (Morriet, Debizet, et Wurtz 2019) :

$$Max \tau_{autoconsommation} : Min \sum_t |production_autoconsommée[t] - production_totale[t]| \quad (14)$$

$$Max \tau_{autoproduction} : Min \sum_t |consommation_autoproduite[t] - consommation_totale[t]| \quad (15)$$

En maximisant le taux d’autoconsommation et le taux de production, on maximise la corrélation entre la production et à la consommation à chaque instant, intitulé *maximize_conso_prod_match* dans l’outil, et modélisé comme le fait de minimiser la différence entre la production locale et la consommation totale (cf. équation (16)) :

$$Max \text{ corrélation} : Min \sum_t |production_locale[t] - consommation_totale[t]| \quad (16)$$

Nous comparons dans la partie suivante les résultats issus des deux cas d’étude en appliquant ces objectifs. Les calculs d’optimisation des taux d’autoconsommation et des taux d’autoproduction requièrent l’accès à la variable de la production autoconsommée et de la consommation autoproduite. Dans le schéma du cas d’étude de l’autoconsommation collective Figure 82, ce flux est situé dans le domaine de responsabilité du gestionnaire du réseau et du fournisseur d’énergie (flèches violettes). Cette particularité met selon nous en évidence la dissociation entre les échanges réels et la clef de répartition permise par l’autoconsommation collective. En effet, un projet d’autoconsommation collective nécessite une injection de la production sur le réseau basse tension - permettant alors à la production d’être consommée au plus proche et pas nécessairement par un consommateur intégrant la personne morale - et la définition d’une clef de répartition des échanges au pas de temps de 30 minutes - qui sera donc, dans la majorité des cas, décorrélée de la réelle production. Et ce, d’autant plus que le projet n’est plus restreint à l’antenne basse tension ni au transformateur, mais permet une distance de deux kilomètres entre les prosumers les plus éloignés. C’est pourquoi, nous avons fait le choix – qu’il nous semble à restreindre au cas de l’autoconsommation collective – d’ajouter au domaine de responsabilité de la personne morale, le nœud d’injection du panneau photovoltaïque et

¹¹⁵ Le code est disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes/-/tree/master/omegalpes/actor/operator_actors/prosumer_actors.py.

les exports qui en sont issus, bien qu'ils ne devraient pas en faire partie si l'on considère que l'électricité produite par le panneau photovoltaïque doit être injectée dans le réseau public d'électricité.

VI.4 Optimisation et résultats

Dans cette sous-partie, nous comparons les résultats pour les deux types d'assemblage : autoconsommation individuelle et autoconsommation collective pour les trois objectifs identifiés dans la section précédente (VI.4.i). Ensuite, nous comparons les résultats et la vitesse de résolution, si le modèle utilise une unité de production « imaginaire » pour modéliser les panneaux photovoltaïques (VI.4.ii). Enfin, nous étudions les deux projets dans un cas hypothétique où le gestionnaire de réseau imposerait de ne pas injecter d'électricité sur le réseau, afin d'éviter un changement de transformateur par exemple.

VI.4.i Comparaison des résultats obtenus pour l'autoconsommation individuelle et l'autoconsommation collective en fonction de trois objectifs : maximiser le taux d'autoconsommation, maximiser le taux d'autoproduction et maximiser la corrélation entre production et consommation

Le Tableau 10 présente les résultats obtenus pour l'autoconsommation individuelle et l'autoconsommation collective, avec les objectifs de maximiser le taux d'autoconsommation, de maximiser le taux d'autoproduction, et enfin de maximiser la corrélation entre la production des panneaux et les consommations. L'autoconsommation collective favorise l'installation d'un plus grand nombre de modules photovoltaïques.

		Autoconsommation collective	Autoconsommation individuelle
Max $\tau_{\text{auto-consommation}}$	Nombre de modules PV	13	5
	Production PV	5,74 kWh	2,21 kWh
	Exports	0 kWh	82,2 Wh
	Imports	158 kWh	161 kWh
Max $\tau_{\text{auto-production}}$	Nombre de modules PV	300	300
	Production PV	133 kWh	133 kWh
	Exports	106 kWh	109 kWh
	Imports	137 kWh	140 kWh
Max corrélation	Nombre de modules PV	34	27
	Production PV	15,0 kWh	11,9 kWh
	Exports	1,75 kWh	5,57 kWh
	Imports	150 kWh	154 kWh

Tableau 10 : Résultats des optimisations pour les projets d'autoconsommation individuelle et d'autoconsommation collective
| Source : Auteure

La Figure 85 montre graphiquement, pour le cas de l'autoconsommation collective, la production par rapport à l'ensemble de la consommation en fonction de l'objectif choisi. Cette production est bien sûr proportionnelle au nombre de panneaux photovoltaïques installés.

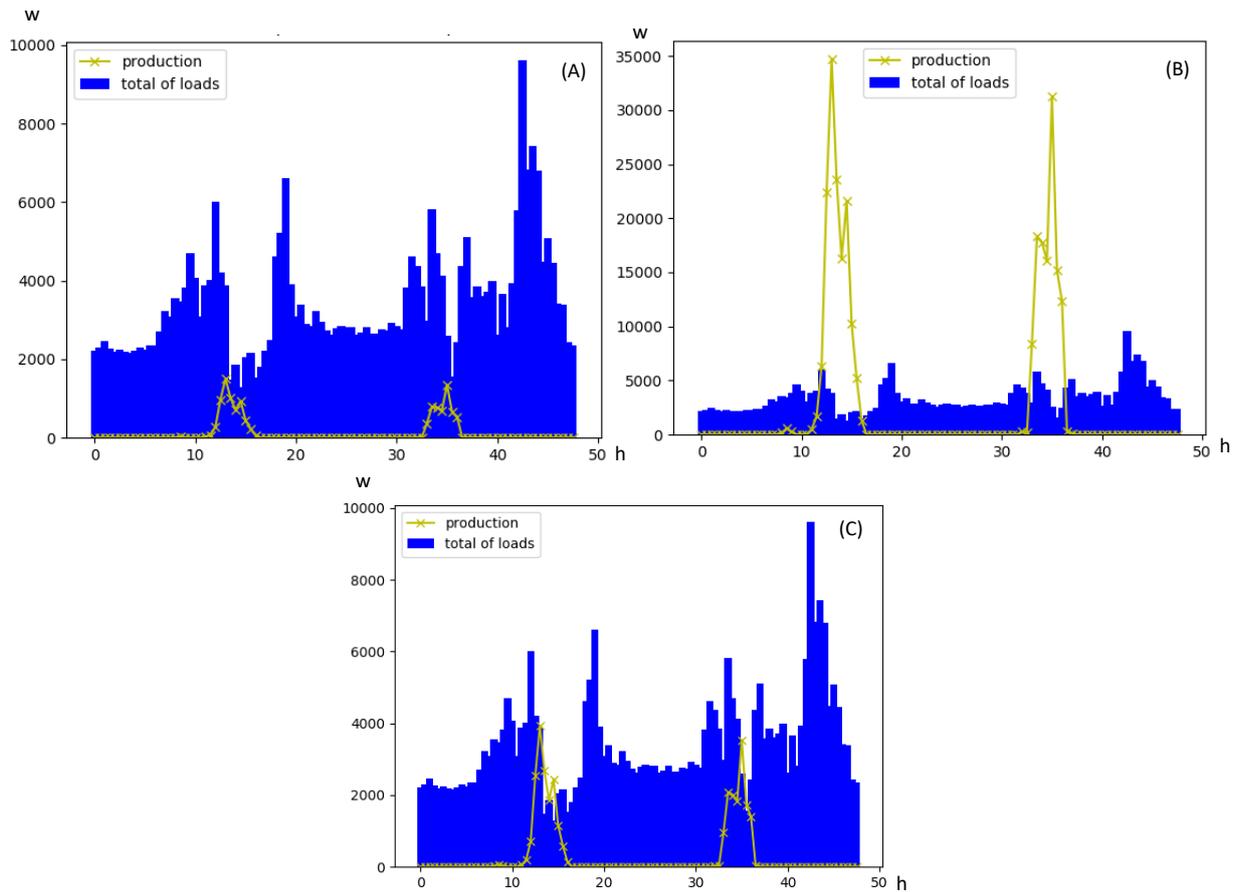


Figure 85 : Évolution de la production en fonction de l'objectif de maximiser le taux d'autoconsommation (A), de maximiser le taux d'autoproduction (B) et de maximiser la corrélation entre production des panneaux et consommation (C) | Source : Auteure

Nous avons cherché à illustrer, à l'aide de la Figure 86, le fait que l'autoconsommation collective favorise l'installation d'un plus grand nombre de modules photovoltaïques. Plaçons-nous dans le cas de la maximisation du taux d'autoconsommation. Dans ce cas, l'optimisation va chercher à ajuster la production de façon à ce que le maximum de la production soit autoconsommé, c'est à dire en minimisant la réinjection sur le réseau. Sur la Figure 86, dans le cas de l'autoconsommation collective, un module est choisi, alors que dans le cas de l'autoconsommation individuelle, aucun panneau n'est choisi. En effet, si l'on regarde les deux courbes de consommation individuellement, il y a plus de production totale que de production autoconsommée. Il n'y a donc pas d'intérêt à installer de panneau. En revanche, dans le cadre de l'autoconsommation collective, il y a plus de production autoconsommée que de production totale, ce qui rend l'installation d'un module photovoltaïque intéressant. Dans le cadre de l'autoconsommation collective, les exports sont cependant plus importants.

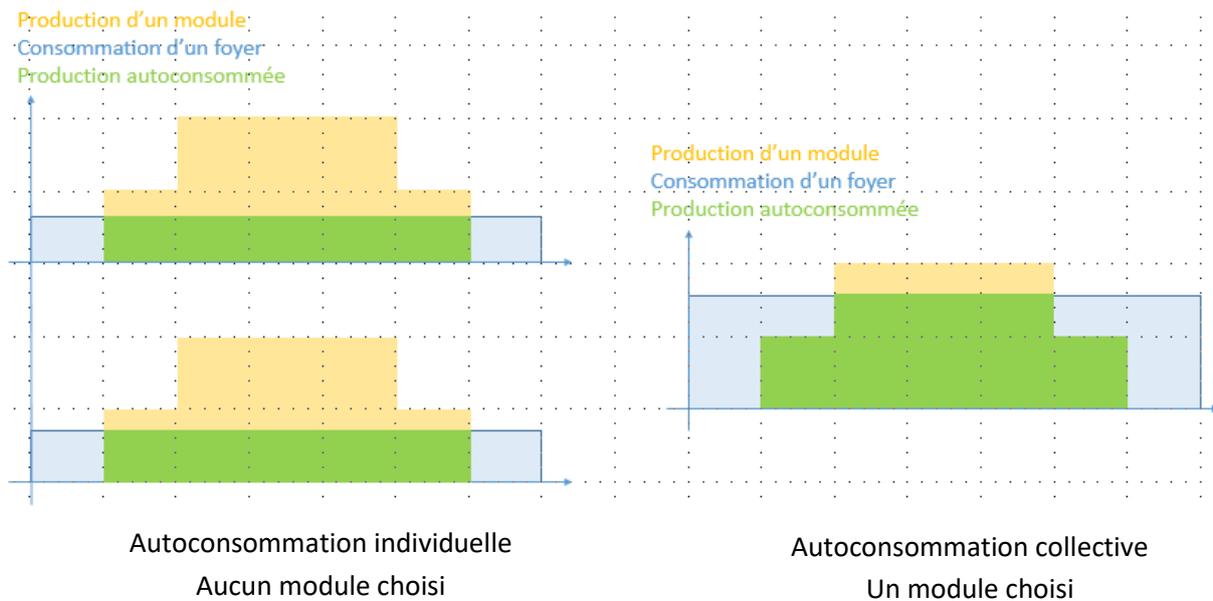


Figure 86 : Illustration du choix du nombre de panneaux pour l'optimisation du taux d'autoconsommation | Source : Auteure

VI.4.ii Comparaison avec la modélisation imaginaire

Autoconsommation individuelle Objectif : maximiser la corrélation entre la production et la consommation	Modèle de référence	Model imaginaire
Nombre de variables	9814 continues, 6922 entières (6912 binaires)	9824 continues, 6912 entières (6912 binaires)
Paramètre <i>imaginary</i> au sein de l'unité <i>SeveralProductionUnit</i>	<i>False</i>	<i>True</i>
Temps de génération du modèle	9,9 s	10,3 s
Temps de résolution du modèle	14,7 s	5,6 s
Nombre de modules photovoltaïques conseillé	27	26,57

Tableau 11 : Tableau de comparaison entre une modélisation imaginaire et non imaginaire | Source : Auteure

Le Tableau 11 présente les résultats issus de la modélisation du problème d'autoconsommation individuelle lorsque le nombre de modules photovoltaïques est imaginaire (nombre décimal) ou non (nombre entier). Les calculs ont été réalisés avec un Intel® core™ i5-3340M CPU, 2,7 GHz. Dans le premier cas, la résolution est réalisée en 14,7 secondes et dans le second cas en 5,6 secondes. Le temps de résolution est effectivement plus court pour la modélisation imaginaire, ce qui peut être intéressant dans le cas de temps de résolution de plusieurs heures. Cela peut être le cas pour des problèmes plus complexes.

VI.4.iii Problème infaisable

Nous nous intéressons à présent au problème d'autoconsommation collective uniquement. Les prosumers ont identifié un grand toit permettant d'accueillir 40 modules photovoltaïques. La personne morale indique donc en premier lieu vouloir absolument au moins 40 modules photovoltaïques. Pour modéliser cette contrainte (« vouloir absolument »), nous utilisons dans le code la contrainte

add_nb_unit_minimum. Par ailleurs, le projet se trouve dans une zone rurale où il faudrait changer de transformateur dans le cadre d'un raccordement de production énergétique. Les prosumers ne souhaitant pas changer le transformateur pour des coûts trop importants, le gestionnaire accepte de laisser le projet se monter, à la condition qu'aucune énergie ne soit renvoyée sur le réseau. La contrainte *add_energy_transfer_maximum* est alors ajoutée avec un maximum valant zéro. Au vu des données d'entrée, le problème est infaisable, mais combiné à de nombreuses autres contraintes (non modélisés), les parties prenantes du projet n'identifient pas le problème directement.

Le module LPFICS est alors utilisé dans l'outil. Les contraintes suivantes sont identifiées :

```

ActorConstraint :: legal_person_nb_unit_min_pv
DefinitionDynamicConstraint :: grid_node_1_power_balance_26
DefinitionDynamicConstraint :: grid_node_2_power_balance_26
DefinitionDynamicConstraint :: grid_node_3_power_balance_26
DefinitionDynamicConstraint :: grid_node_4_power_balance_26
DefinitionDynamicConstraint :: grid_node_5_power_balance_26
DefinitionDynamicConstraint :: grid_node_6_power_balance_26
DefinitionDynamicConstraint :: grid_node_7_power_balance_26
DefinitionDynamicConstraint :: grid_node_8_power_balance_26
DefinitionDynamicConstraint :: grid_node_9_power_balance_26
DefinitionDynamicConstraint :: grid_node_10_power_balance_26
ActorConstraint :: grid_operator_collected_energy_max
DefinitionDynamicConstraint :: pv_node_power_balance_26
DefinitionDynamicConstraint :: pv_calc_power_with_nb_unit_26
ActorConstraint :: legal_person_nb_unit_max_pv

```

On identifie trois contraintes liées aux acteurs : *legal_person_nb_unit_min_pv*, *grid_operator_collected_energy_max*, *legal_person_nb_unit_max_pv*. En relâchant l'une après l'autre ces contraintes, les acteurs peuvent identifier que les deux contraintes *legal_person_nb_unit_min_pv* et *grid_operator_collected_energy_max* sont incompatibles l'une par rapport à l'autre. En utilisant directement le module d'identification des contraintes liées aux acteurs : *lpfics.find_definition_and_actor_incompatible_constraints_set*, les contraintes incompatibles identifiées, liées aux acteurs, sont *legal_person_nb_unit_min_pv*, *grid_operator_collected_energy_max*.

VI.4.iv Front de Pareto

Pour permettre aux acteurs de discuter, nous avons donc transformé la contrainte de l'opérateur réseau en un objectif : *minimize_energy_transfer* et supprimé la contrainte de la personne morale. Un front de Pareto est alors calculé pour l'objectif de maximiser la corrélation entre la production et la consommation, pour les prosumers, et pour l'objectif de minimiser l'énergie collectée, pour le gestionnaire de réseau. Ceci donne l'équation suivante :

$$\alpha * maximize_{correlation} + (1 - \alpha) * minimize_{energy_transfer} \quad (17)$$

Nous avons tracé les fronts de Pareto dans le cas du problème de référence (A) et dans le cas d'un problème imaginaire (B) en faisant varier α entre 0 et 1 avec un pas de 0,05. Nous obtenons alors les graphiques suivants (cf. Figure 87) :

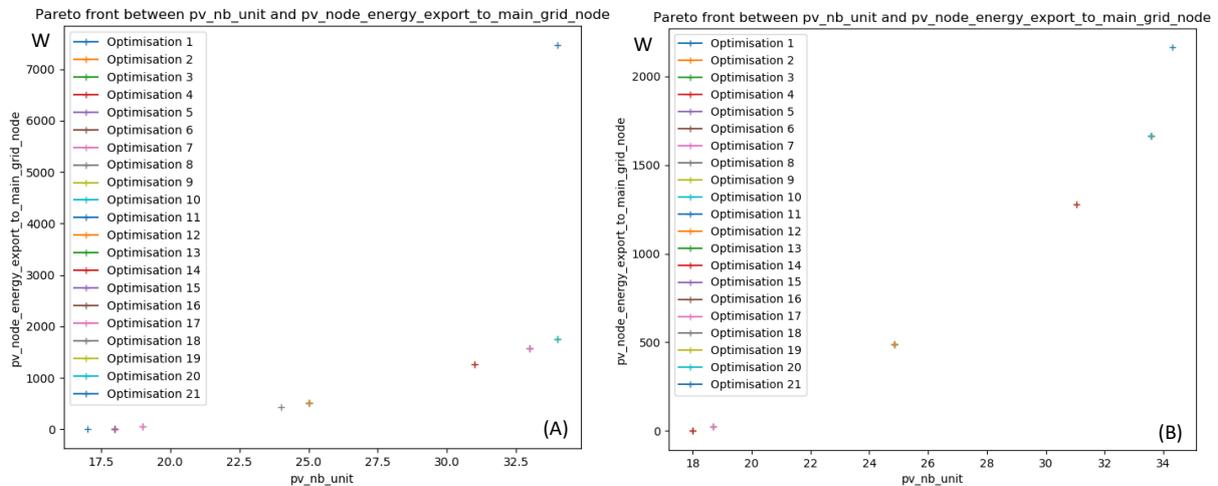


Figure 87 : Front de Pareto dans le cas du problème de référence (A) et dans le cas d'un problème imaginaire (B) avec en faisant varier α entre 0 et 1 avec un pas de 0,05 | Source : Auteure

Les parties prenantes peuvent alors être amenées à choisir un nombre de panneaux ou à rediscuter le modèle au besoin. Le front de Pareto tracé dans le cas du problème de référence propose un point, correspondant à 34 panneaux, avec une énergie, en sortie du nœud photovoltaïque pour réinjection dans le réseau, très supérieure aux autres. Ce point s'explique par le fait qu'il n'y a plus aucun enjeu sur l'autoconsommation (l'objectif correspondant étant nul) et donc que les flux énergétiques issus du nœud du panneau photovoltaïque vont directement dans le réseau avant d'être réinjectés dans les logements. Pour rappel, les calculs d'autoconsommation collective sont artificiels d'un point de vue technique. Ils ont un sens économique. Il est donc possible de trouver, par le calcul, ce type de solution si l'enjeu ne porte plus sur une optimisation liée à l'autoconsommation.

Conclusion du chapitre VI

Ce chapitre nous a permis de présenter une application des modèles développés dans la bibliothèque OMEGAAlpes dans le cadre d'un projet d'autoconsommation électrique. Nous avons réalisé cette application sous forme d'un tutoriel afin que de nouveaux projets puissent s'appuyer sur cette présentation. Il s'agit de comparer un système d'autoconsommation collective et plusieurs systèmes d'autoconsommation individuelle. Le système technique (unités de consommation, panneaux photovoltaïques, compteurs Linky) est alors le même, mais l'assemblage, incluant les acteurs (prosumers et personne morale, fournisseur et gestionnaire), est différent. Ce cas d'étude permet de mettre en évidence des différences entre les deux solutions identifiées par les parties prenantes. Nous comparons les résultats obtenus pour trois objectifs : maximiser le taux d'autoconsommation, maximiser le taux d'autoproduction et maximiser la corrélation entre la production des panneaux et la consommation. L'autoconsommation collective favorise l'installation d'un plus grand nombre de modules photovoltaïques. Un second cas d'étude sur la récupération de chaleur fatale est présenté en annexe (cf. Annexe I).

Conclusion, perspectives d'utilisation de l'outil et discussion sur l'interdisciplinarité de nos travaux

Synthèse de la thèse

Cette thèse vise à accompagner la conception de projets énergétiques, et plus particulièrement les systèmes énergétiques locaux bas-carbone (SELBC). Il s'agit de systèmes énergétiques de capture et d'échanges *in situ* d'énergie renouvelable intermittente ou de récupération.

Le chapitre I de cette thèse étudie et définit les SELBC. Au-delà des changements déjà identifiés pour les projets basés sur les énergies renouvelables vis-à-vis des grands systèmes énergétiques, les SELBC ont la particularité de faire disparaître la distinction entre les fonctions de production et de consommation, voire entre les fonctions de fourniture et de consommation, qui peuvent alors être portées par un même acteur. Ainsi, des consommateurs « historiques » prennent en main la production d'énergie locale (chaleur, électricité, gaz), ainsi que les échanges locaux entre plusieurs consommateurs (électricité). Ces évolutions nous invitent à considérer un nouveau paradigme, celui des systèmes énergétiques locaux bas-carbone, synthétisé dans le Tableau 12.

	Paradigme conventionnel	Paradigme « Système énergétique local bas-carbone »
Ressource	Stock fini	<i>Flux renouvelable ou de récupération</i>
Type d'énergie	Concentrée	<i>Diffuse</i>
Production	Centralisée	Centrée sur le local
Technologie	Grande échelle	<i>Petite échelle</i>
<i>Localisation</i>	<i>En zone peu dense (loin de la consommation)</i>	<i>En zone habitée dense (proche de la consommation)</i>
Marché / Type de transaction	Monopole	Contractualisé via des conventions entre acteurs
Conception	<i>Mono-acteur</i>	Multiacteur
Impact environnemental	Grand, planétaire	<i>Petit, local</i>

Tableau 12 : Présentation du paradigme associé aux systèmes énergétiques locaux bas-carbone en comparaison avec le paradigme énergétique conventionnel | Source : Auteure à partir de (Bulkeley et Castan Broto, Vanesa 2012)

L'étude des SELBC a mis en évidence l'imbrication entre le système technique et les acteurs du projet. C'est pourquoi nous souhaitons dépasser une vision purement technique des SELBC et les considérer comme des assemblages socio-énergétiques d'actants humains et d'actants non-humains (équipements techniques énergétiques et non énergétiques, cadre réglementaire...). Le caractère multiacteurs des SELBC transforme la conception usuellement mono acteur des systèmes énergétiques. L'évolution de la relation entre production et consommation nous a incité à élaborer une typologie d'acteurs en fonction de leur rôle dans la conception et le fonctionnement des SELBC.

La conception des systèmes énergétiques s'appuie aujourd'hui largement sur des outils numériques d'aide à la conception. Au vu des évolutions des systèmes énergétiques présentés ci-dessus, il nous a semblé essentiel de nous demander **quelles évolutions des outils d'aide à la conception sont**

nécessaires pour accompagner les projets énergétiques bas-carbone multiacteurs. La thèse identifie trois paradoxes qui appellent une évolution pour les outils :

- 1^{er} paradoxe : Alors que les informations sur le projet sont incertaines en phase de pré-étude (situation exacerbée dans le cas de projets émergents), les décisions prises par les parties prenantes ont le plus d'impact.
- 2^{ème} paradoxe : Alors que les SELBC impliquent une multitude d'acteurs dans la conception, les outils d'aide à la conception ont été développés pour un acteur unique.
- 3^{ème} paradoxe : Alors que les différents points de vue des parties prenantes formatent le SELBC conçu, ils ne sont pas pris en compte de manière explicite dans les modèles.

La thèse vise à répondre à ces paradoxes en proposant des évolutions au niveau des outils et des modèles, et en invitant à recourir à une analyse qualitative des projets.

Ainsi, le chapitre II propose de repenser les outils d'aide à la conception pour qu'ils deviennent outils d'aide à la synchronisation cognitive et support de négociation, afin de prendre en compte le caractère multiacteur des SELBC. Il s'agit d'aider les acteurs à converger vers une formulation commune du problème, faisant consensus autour des contraintes et objectifs identifiés pour les uns et pour les autres. Le but final est de leur permettre d'avoir la conviction qu'un projet peut émerger. Les métamodeleurs (i.e. proposant des briques de modèles) d'optimisation linéaire mixte (MILP) open source basés sur un langage orienté objet, avec une interface graphique et des notebooks, nous paraissent répondre à ces besoins. Trois outils intégrant majoritairement ces critères ont pu être identifiés : Calliope, oemof et OMEGAlpes. Zoomant ensuite sur les entrées d'un modèle d'optimisation MILP, nous avons mis en évidence que les contraintes jouent un rôle très important, et qu'il est donc nécessaire, pour les parties prenantes, de pouvoir les négocier. En effet, le problème modélisé peut être sans solution si les contraintes imposées par les acteurs sont incompatibles. Identifier les contraintes incompatibles et leur degré de négociation permet d'accompagner les parties prenantes du SELBC dans le choix du relâchement des contraintes, afin d'assurer qu'il est possible d'identifier au moins une solution. Concernant les solutions, l'approche de type front de Pareto, déjà bien répandue, permet de les comparer. Enfin, plusieurs représentations graphiques de modèle sont présentées et comparées pour accompagner la synchronisation cognitive entre les acteurs. Un choix pertinent serait une représentation simplifiée de l'assemblage, tout en mettant en évidence les grandes caractéristiques des unités énergétiques du SELBC et des acteurs associés.

Le chapitre III fait écho au chapitre précédent, en proposant des algorithmes, des méthodes, des outils faisant suite aux besoins, mis en évidence dans le chapitre précédent, pour accompagner la négociation et la synchronisation cognitive entre les parties prenantes. Parmi les trois outils identifiés dans la cartographie des métamodeleurs d'optimisation, nous avons choisi de travailler avec OMEGAlpes. Plusieurs développements réalisés sur cet outil sont alors présentés : la possibilité de réaliser un dimensionnement « imaginaire » pour accélérer la résolution, la possibilité d'identifier des contraintes rendant le problème sans solution et leur type (physique ou de définition, technique, liée aux acteurs) associé à un degré de négociation (non négociable, peu négociable, négociable), la possibilité de modéliser graphiquement un problème d'optimisation à partir d'une interface graphique et enfin la possibilité de tracer automatiquement un front de Pareto pour comparer les solutions.

Dans le chapitre III, les développements proposés n'intègrent pas un modèle explicite des acteurs, pourtant identifié comme une réponse au 3^{ème} paradoxe. Cela a donc fait l'objet du chapitre IV. Nous présentons dans un premier temps un état de l'art sur les modèles d'acteurs, réalisé à partir d'une recherche par mots clefs. Plusieurs approches de prise en compte des acteurs dans les projets énergétiques ont pu être mise en évidence : la proposition de modèles multiacteurs, l'analyse comparative d'études selon plusieurs acteurs, l'intégration d'acteurs dans le processus de modélisation, ou encore la discussion avec plusieurs experts sur le processus de modélisation ou le modèle. Concernant les modèles multiacteurs, nous avons mis en évidence deux catégories de modèles : la modélisation d'actions et la modélisation d'objectifs. Au vu des conditions d'utilisation de l'outil, il nous semble que la modélisation d'action est trop détaillée et que la modélisation d'objectifs est insuffisante. Nous proposons donc un autre modèle d'acteurs : un modèle parcimonieux et effectif ne modélisant que les objectifs et les contraintes des parties prenantes. Les contraintes et les objectifs représentant les « raisons influentes » portées par les parties prenantes et modifiant la forme du SELBC. Le modèle est basé à la fois sur une approche orientée objet, facilitant une modélisation compréhensible, ainsi qu'une distinction entre le modèle associé à la technique et le modèle associé aux acteurs, et sur la théorie des nœuds socio-énergétiques menant à la prise en compte d'une zone de responsabilité pour les acteurs dans le modèle. Trois limites assumées de ce modèle sont à considérer : il s'agit d'un modèle partiel des acteurs ; une sélection des acteurs modélisés est réalisée ; et on observe une complexification de la modélisation.

Une fois définie dans le chapitre IV l'architecture d'un modèle d'acteurs, nous identifions dans le chapitre V les raisons influentes, et plus précisément les objectifs et les contraintes, propres à chaque type d'acteurs. Les sciences sociales s'intéressant à l'étude des acteurs, nous nous sommes basée sur des méthodologies utilisées dans ces disciplines. Il s'agit plus précisément des enquêtes qualitatives et de leur analyse afin d'identifier les raisons influentes des parties prenantes. N'ayant pas réalisé d'enquête de terrain, nous avons analysé des rapports de thèses étudiant des SELBC. L'analyse vise alors à identifier, dans le texte, les acteurs du projet, leurs raisons influentes et, si possible, leurs contraintes et objectifs. Pour réaliser cette analyse, nous nous sommes appuyée sur le logiciel d'analyse qualitative Nvivo. Nous présentons de manière détaillée la méthodologie via une application sur la valorisation de chaleur fatale à Dunkerque. Trois autres SELBC de valorisation de chaleur fatale ou d'autoconsommation collective ont également été analysés. Les résultats sont présentés en annexe (cf. Annexe E, Annexe F, Annexe G). Enfin, une dernière partie permet de discuter les limites de notre méthodologie, que ce soit vis-à-vis de la méthode d'analyse elle-même ou vis-à-vis des modèles qui en sont issus.

Enfin, nous présentons dans le sixième chapitre une application des modèles développés dans la bibliothèque OMEGAlpes dans le cadre d'un projet d'autoconsommation électrique. Il s'agit de comparer un système d'autoconsommation collective et plusieurs systèmes d'autoconsommation individuelle. Le système technique (unités de consommation, panneaux photovoltaïques, compteurs Linky) est alors le même, mais l'assemblage, incluant les acteurs (prosumers et personne morale, fournisseur et gestionnaire), est différent. Ce cas d'étude permet de mettre en évidence des différences entre les deux solutions identifiées. Nous comparons les résultats obtenus pour trois objectifs : maximiser le taux d'autoconsommation, maximiser le taux d'autoproduction et maximiser la corrélation entre la production des panneaux et la consommation. Dans les trois cas,

l'autoconsommation collective favorise l'installation d'un plus grand nombre de modules photovoltaïques. Un second cas d'étude sur la récupération de chaleur fatale est présenté en annexe (cf. Annexe I).

Perspectives d'utilisation des travaux de cette thèse

L'outil OMEGAAlpes et les briques de modèles associées ont été mobilisés dans cette thèse sur un cas d'étude pour illustrer leur application. Dans ce cadre, nous avons mis en évidence des différences effectives selon l'assemblage et un intérêt pour la modélisation des acteurs. Il conviendra désormais de mettre l'outil à l'épreuve des acteurs. D'une part, il importe d'évaluer la prise en main de l'outil et, notamment la capacité à mobiliser les modules relatifs aux contraintes et objectifs des acteurs experts et non experts de la conception de projets énergétiques. D'autre part, il faudrait tester une des hypothèses fondatrices de cette thèse : la pertinence de l'outil en matière de négociation. Dans les deux cas, il sera probablement nécessaire de recourir à la méthodologie d'analyse qualitative pour compléter la bibliothèque de modèles afin d'adapter la modélisation au projet. La pertinence de l'outil pourrait être mesurée par le nombre d'utilisateurs, le nombre de projets effectivement développés grâce à son utilisation, une baisse des temps de définition, de conception et/ou de déploiement, ou encore sa capacité à permettre des négociations.

Au-delà de l'outil OMEGAAlpes, les briques de modèles développées peuvent être reprises séparément pour d'autres métamodeleurs. Il pourrait alors être intéressant de suivre la dissémination de ces briques de modèles. Par ailleurs, la méthodologie d'analyse qualitative et la représentation graphique proposée pourraient également être utilisées séparément. Il pourrait donc être également intéressant de tester leur propre efficacité.

Un point qui nous semble également intéressant est d'identifier d'autres besoins, en plus de la négociation, auprès des acteurs qui pourraient utiliser notre outil. Ce travail a été initié dans le cadre de l'analyse réalisée via Nvivo. Cependant, cette question est peu abordée dans les rapports et les entretiens analysés. Cette question pourrait néanmoins faire l'objet de futures recherches. Il s'agira alors, à nouveau, d'adapter l'outil ou de proposer de nouveaux outils adaptés à ces besoins. Les perspectives soulignent la dimension interdisciplinaire de ce travail de modélisation des acteurs dans une modélisation des systèmes techniques, et appellent une discussion sur l'interdisciplinarité dans cette recherche doctorale.

Nos travaux au prisme de l'interdisciplinarité

Un travail basé sur les sciences pour l'ingénieur et les sciences sociales

Comme présenté tout au long de cette thèse, nos travaux s'appuient à la fois sur les sciences pour l'ingénieur et les sciences sociales. Plus précisément, dans les sciences pour l'ingénieur, nous nous appuyons sur les travaux issus des sciences de la conception, de l'optimisation et des sciences de la modélisation. Pour les sciences sociales, ce sont majoritairement des travaux en urbanisme et en aménagement du territoire, et dans une moindre mesure, en sociologie et en architecture.

Conditions de réalisation de la thèse

La thèse a en effet été réalisée au sein de deux laboratoires ancrés sur les disciplines évoquées précédemment : le laboratoire de génie électrique de Grenoble et le laboratoire de sciences sociales Pacte. Elle a également été encadrée par deux chercheurs, chacun inscrivant ses activités de recherche dans l'une des deux disciplines. Dans le cadre du projet interdisciplinaire Eco-SESA, les équipes de recherche des deux laboratoires ont été amenées à travailler ensemble au-delà du cadre spécifique de cette thèse.

Des différences majeures entre les sciences pour l'ingénieur et les sciences sociales

Dans ce cadre, nous avons mis en évidence deux différences principales qu'il nous semble essentiel de mentionner. La première, largement diffusée, est que les sciences sociales s'intéressent en premier lieu aux enjeux en lien avec les humains, quand les sciences pour l'ingénieur s'intéressent en premier lieu aux objets techniques. Ainsi, pour un même objet d'étude, tel que les systèmes énergétiques, les sciences de l'ingénieur s'intéresseront plus particulièrement aux techniques de production, transport, consommation de l'énergie, voire à leur gestion etc. et les sciences sociales s'intéresseront à la relation des acteurs avec le système technique, aux relations entre acteurs préexistantes ou induites par les systèmes énergétiques, etc.

La seconde différence porte davantage sur l'apport de la discipline à l'objet d'étude. Les sciences sociales interrogent l'objet d'étude et le lient à des problématiques plus larges associées à des acteurs humains. Il s'agit alors d'observer l'objet d'étude en détail, possiblement sous différents angles. Puis, si cela est possible et intéressant, d'en tirer des analyses les plus génériques possibles. Les sciences pour l'ingénieur visent à trouver des solutions techniques pour répondre au problème posé. Dans son livre intitulé « Pratiques de l'interdisciplinarité », (Vinck 2000, 99-100) présente un cas de collaboration entre sociologues et ingénieurs, et indique que « les ingénieurs concernés raisonnent par rapport à un problème donné et par rapport à un objectif qu'il s'agit d'atteindre », tandis que « les sociologues de ce projet ont une tout autre manière de procéder. Tout d'abord, ils ne supposent pas acquise la définition du problème ou la formulation de la question. Ils tiennent à l'explorer par eux-mêmes et au besoin, à la reformuler. (...) Puis, rapidement après une série d'enquêtes qualitatives exploratoires, les sociologues sont en mesure de présenter des hypothèses de réponses aux questions majeurs ». Il faudra alors un certain temps pour permettre aux sociologues de valider ces hypothèses à partir d'analyses de terrains.

Réalisant une thèse en ingénierie, notre objectif est d'accompagner la conception des systèmes énergétiques via des outils d'aide à la conception. Nous avons cherché dans un premier temps à comprendre l'objet étudié. Pour ce faire, nous nous sommes appuyée sur des études menées en sciences sociales et nous avons mis en évidence un nouveau type de projets énergétiques : les SELBC. Dans ce cadre, nous avons mis en évidence l'importance des acteurs dans la conception des SELBC. Devant ce constat nous avons cherché à prendre en compte les acteurs dans les outils d'aide à la conception des projets énergétiques. Cependant, historiquement, les sciences pour l'ingénieur conçoivent des systèmes techniques en occultant la dimension actorielle. Notre thèse s'appuie sur les deux disciplines afin de prendre en compte les logiques des acteurs dans la démarche de conception des systèmes énergétiques.

Le dilemme de la simplification : de la complexité mise en évidence par les sciences sociales à la modélisation parcimonieuse nécessaire pour les outils

Nous l'avons répété à de nombreuses reprises, la modélisation consiste à produire une représentation simplifiée de la réalité. Le dilemme de la simplification du problème est donc déjà bien présent dans les sciences de l'ingénieur. Nous souhaitons simplement mettre en évidence ici que ce dilemme est exacerbé dans le cas d'un travail en interdisciplinarité avec les sciences sociales qui cherchent au contraire à comprendre et à mettre en évidence toute la complexité des objets étudiés.

Pluridisciplinarité, interdisciplinarité ou transdisciplinarité : une thèse majoritairement interdisciplinaire

Nous avons donc mobilisé plusieurs disciplines dans l'idée d'accompagner la conception des systèmes énergétiques locaux bas-carbone. Dans « Pratiques de l'interdisciplinarité », (Vinck 2000) définit et différencie la pluridisciplinarité, l'interdisciplinarité et la transdisciplinarité. Selon (Vinck 2000), la pluridisciplinarité « consiste à juxtaposer des points de vue et de contribution relevant de disciplines distinctes », l'interdisciplinarité « suppose un dialogue, un échange ou une confrontation entre plusieurs disciplines » et la transdisciplinarité « suppose la poursuite d'un projet dépassant les disciplines existantes ».

Il nous semble que nos travaux sont majoritairement interdisciplinaires, s'orientant sur certains points plus vers la pluridisciplinarité ou vers la transdisciplinarité. (Vinck 2000, 62) définit trois modalités d'interdisciplinarité. La modalité la plus proche de notre démarche est la suivante : « Recherche réalisée à partir du champ théorique d'une discipline (les sciences de l'ingénieur). Celle-ci entre alors en dialogue avec les problématiques, les concepts et les méthodes d'une autre discipline (l'urbanisme et l'aménagement du territoire ou encore la sociologie) dans la perspective, soit d'y emprunter quelques éléments nouveaux, soit de remettre en cause quelques ingrédients de sa propre discipline ».

Le premier chapitre définit un nouvel objet d'étude : les SELBC. Cette démarche a été pour nous plutôt pluridisciplinaire. Il s'agissait de définir les SELBC d'un point de vue technique et, de manière plus globale, d'intégrer les acteurs dans la définition de l'objet. Les deux points de vue sont accumulés, mais pas discutés l'un par rapport à l'autre.

Les deuxième et troisième chapitres se basent sur les sciences de l'ingénieur et plus particulièrement la modélisation, et s'avèrent monodisciplinaires. Le caractère interdisciplinaire que l'on pourrait y trouver est que l'on cherche à transformer les usages des outils d'aide à la conception en outils d'aide à la négociation pour les acteurs, la question des usages étant plutôt portée par les sciences sociales.

Le quatrième chapitre est pour nous interdisciplinaire. Nous nous sommes en effet basée de manière assez équivalente sur des notions issues des deux disciplines, afin d'identifier la prise en compte des acteurs dans la conception de projets énergétiques (au sens large). En particulier, nous avons mobilisé des concepts des deux disciplines pour élaborer le modèle d'acteurs. Il ne nous semble cependant pas qu'il s'agisse d'un travail transdisciplinaire, car nous n'avons pas cherché à transformer les outils d'aide à la conception pour qu'ils puissent prendre en compte la modélisation des acteurs, mais nous avons

cherché à modéliser les acteurs et leurs caractéristiques avec les outils actuellement développés dans le cadre des sciences pour l'ingénieur.

Le cinquième chapitre est clairement interdisciplinaire, car il utilise une méthode de travail issue des sciences sociales, les enquêtes et l'analyse qualitative, pour élaborer un modèle proposé dans les métamodeleurs d'optimisation. Nous proposons ainsi une nouvelle méthode de travail pour les sciences de l'ingénieur.

À l'issue de cette thèse nous espérons que les apports de ce travail pourront *in fine* permettre d'améliorer les modalités de conception des SELBC, et par là de contribuer à la lutte contre le changement climatique.

Références

Références

Bibliographie

- Abdmouleh, Zeineb, Adel Gastli, Lazhar Ben-Brahim, Mohamed Haouari, et Nasser Ahmed Al-Emadi. 2017. « Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources ». *Renewable Energy* 113 (décembre): 266-80. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.087>.
- Abrial, Stéphanie, et Séverine Louvel. 2011. *Enquêtes qualitatives, enquêtes quantitatives*. Presses Universitaires de Grenoble. Politique en +.
- ADEME. 2017. « La chaleur fatale ». 8821. <https://www.ademe.fr/chaleur-fatale>.
- ADEME, Boris Bailly, Hadrien Hainaut, Léone-Alix Mazaud, et Charlotte Suaud. 2016. « Approche intégrée et multicritères de la modélisation territoriale - Eléments de cadrage pour la gestion des données territoriales ». Rapport d'étude. <http://www.ademe.fr/mediatheque>.
- Aghamolaei, Reihaneh, Mohammad Haris Shamsi, Mohammad Tahsildoost, et James O'Donnell. 2018. « Review of district-scale energy performance analysis: Outlooks towards holistic urban frameworks ». *Sustainable Cities and Society* 41 (août): 252-64. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.048>.
- Akrich, Madeleine, Michel Callon, et Bruno Latour. 2006. *Sociologie de la traduction: textes fondateurs*. Sciences Sociales. Paris, France: Ecole des mines de Paris.
- Albert, Laurent. 2004. « Modélisation et optimisation des alternateurs à griffes. Application au domaine automobile ». Thèse de doctorat, Grenoble, France: Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG. <https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/47171/filename/tel-00007091.pdf>.
- Allegrini, Jonas, Kristina Orehounig, Georgios Mavromatidis, Florian Ruesch, Viktor Dorer, et Ralph Evins. 2015. « A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52 (décembre): 1391-1404. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.123>.
- Alyafi Alzouhri, Amr, Van-Bao Nguyen, Yann Laurillau, Patrick Reignier, Stephane Ploix, Gaëlle Calvary, Joëlle Coutaz, Monalisa Pal, et Jean-Philippe Guilbaud. 2018. « From Usable to Incentive Building Energy Management Systems ». *Modélisation et Utilisation Du Contexte* 2 (1). <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2018.0302>.
- Ammar Khelil, Imen. 2007. « Conception collaborative en génie électrique: Spécification par l'usage et réalisation d'un environnement d'aide au développement. » Thèse de doctorat, Grenoble, France: Université Joseph-Fourier - Grenoble I. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00267094>.
- Atabay, Dennis. 2017. « An open-source model for optimal design and operation of industrial energy systems ». *Energy* 121 (février): 803-21. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.030>.

- Aubert, Flora. 2020. « « Communautés énergétiques » et fabrique urbaine ordinaire. Analyses croisées Allemagne, France, Royaume-Uni ». Thèse de doctorat, Marne-la-Vallée, France: Université Paris Est. <http://www.theses.fr/s182845>.
- Banner, Arnaud. 2017. « Quels modèles d'affaires peuvent émerger pour les quartiers intelligents? quel rôle pourra y jouer l'autoconsommation? » Lyon, France.
- Banos, Arnaud. 2016. *Modéliser, c'est apprendre: itinéraire d'un géographe*. Modélisations, simulations, systèmes complexes. Paris: Editions Matériologiques.
- Barreteau, Olivier, François Bousquet, Michel Étienne, Véronique Souchère, et Patrick d'Aquino. 2010. *Chapitre 1 - La modélisation d'accompagnement : une méthode de recherche participative et adaptative*. Editions Quæ. <http://www.cairn.info/modelisation-d-accompagnement--9782759206209-page-21.htm>.
- Benites-Lazaro, Lira Luz, Leandro Giatti, et Angelica Giarolla. 2018. « Sustainability and governance of sugarcane ethanol companies in Brazil: Topic modeling analysis of CSR reporting ». *Journal of Cleaner Production* 197 (octobre): 583-91. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.212>.
- Bhattacharyya, Subhes C., et Govinda R. Timilsina. 2010. « A review of energy system models ». *International Journal of Energy Sector Management* 4 (4): 494-518. <https://doi.org/10.1108/17506221011092742>.
- Bollinger, L. Andrew, et Viktor Dorer. 2017. « The Ehub Modeling Tool: A flexible software package for district energy system optimization ». *Energy Procedia*, CISBAT 2017 International Conference Future Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale, 122 (septembre): 541-46. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.402>.
- Borén, Sven, Lisiana Nurhadi, Henrik Ny, Karl-Henrik Robèrt, Göran Broman, et Louise Trygg. 2017. « A strategic approach to sustainable transport system development – Part 2: the case of a vision for electric vehicle systems in southeast Sweden ». *Journal of Cleaner Production*, Systematic Leadership towards Sustainability, 140 (janvier): 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.055>.
- Bousquet, François, Christophe Le Page, et Jean-Pierre Müller. 2002. « Modélisation et simulation multi-agent ». In *Actes des deuxièmes assises nationales du GdR I3*, 173-82. https://www.researchgate.net/publication/228581377_Modelisation_et_simulation_multi-agent.
- Boutaud, Benoit. 2016. « Un modèle énergétique en transition ? Centralisme et décentralisation dans la régulation du système énergétique ». Thèse de doctorat, Marne-la-Vallée, France: Université Paris Est. <http://www.theses.fr/2016PESC1173>.
- Boutinet, Jean-Pierre. 2015. *Anthropologie du projet*. PUF. Quadrige.
- Box, George E. P. 1976. « Science and Statistics ». *Journal of the American Statistical Association* 71 (356): 791-99.

- Bréchon (dir.), Pierre. 2011. *Enquêtes qualitatives, enquêtes quantitatives*. Presses Universitaires de Grenoble. Politique en +.
- Brisset, Stéphane. 2007. « Démarches et outils pour la conception optimale des machines électriques ». HDR, Lille, France: Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00264041/document>.
- Bulkeley, Harriet, et Castan Broto, Vanesa. 2012. *Cities and Low Carbon Transitions*. ROUTLEDGE.
- Camus, Benjamin. 2015. « Environnement Multi-agent pour la Multi-modélisation et Simulation des Systèmes Complexes ». Thèse de doctorat, Vandoeuvre-lès-Nancy, France: Université de Lorraine. <https://hal.inria.fr/tel-01752137v2/document>.
- Chazelle, Bernard. 2012. « Natural Algorithms and Influence Systems ». *Communications of the ACM* 55 (12): 101-10. <https://doi.org/10.1145/2380656.2380679>.
- Coltier, Yves, et Corentin Plouhinec. 2019. « Chiffres clés des énergies renouvelables - Édition 2019 ». Commissariat général au développement durable.
- Connolly, D., H. Lund, B. V. Mathiesen, et M. Leahy. 2010. « A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems ». *Applied Energy* 87 (4): 1059-82. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.026>.
- CRE. 2017. « Éléments de réflexion - Les enjeux associés au développement de l'autoconsommation ». Commission de Régulation de l'Énergie. http://www.smartgrids-cre.fr/media/documents/evenements/Autoconsommation_elements_reflexion.pdf.
- Crozier, Michel, et Erhard Friedberg. 1981. *L'acteur et le système les contraintes de l'action collective*. Paris, France: Éd. du Seuil.
- Cutler, Dylan, Dan Olis, Emma Elgqvist, Xiangkun Li, Nick Laws, Nick DiOrio, Andy Walker, et Kate Anderson. 2017. « REopt: A Platform for Energy System Integration and Optimization ». *Renewable Energy*, 75.
- Darses, Françoise. 2009. « Résolution collective des problèmes de conception ». *Le travail humain* Vol. 72 (1): 43-59.
- Deb, Kalyanmoy. 2001. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. 1st ed. Wiley-Interscience series in systems and optimization. New York, États Unis: John Wiley & Sons.
- Debizet (dir.), Gilles. 2013. « Rapport intermédiaire Ecoquartier-Nexus-Energie n°2 ». PACTE-CNRS.
- . 2016. *Scénarios de transition énergétique en ville: acteurs, régulations, technologies*. Paris: La Documentation française.
- Debizet, Gilles. 2018. « Assemblage socio-énergétique et transitions bas-carbone urbaines ». HDR, Grenoble: Université Grenoble Alpes.

- Debizet, Gilles, Melike Yalçın-Riollet, et Antoine Tabourdeau. 2018. « Exploring spatial reconfigurations between consumption and production through the socio-energy assemblage approach ». présenté à 9th International Sustainability Transitions Conference, Manchester, Royaume-Uni, juin.
- Deleuze, Gilles, et Félix Guattari. 1980. *Capitalisme et schizophrénie 2 : Mille plateaux*. Les Editions de minuit. Critique. Paris, France. http://www.leseditionsdeminuit.fr/livre-Capitalisme_et_schizophr%C3%A9nie_2__Mille_plateaux-2015-1-1-0-1.html.
- Delhommais, Mylène. 2019. « Méthode de pré-design par optimisation en électronique de puissance ». Thèse de doctorat, Grenoble, France: Université Grenoble Alpes. <http://www.theses.fr/2019GREAT017>.
- Delval, Florent, Miao Guo, Koen H. van Dam, Jonas Stray, Kate Haigh, Johann Görgens, et Nilay Shah. 2016. « Integrated multi-level bioenergy supply chain modelling applied to sugarcane biorefineries in South Africa ». In *Computer Aided Chemical Engineering*, édité par Zdravko Kravanja et Miloš Bogataj, 38:2037-42. 26 European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63428-3.50344-1>.
- Dinh, Van Binh. 2016. « Méthodes et outils pour le dimensionnement des bâtiments et des systèmes énergétiques en phase d'esquisse intégrant la gestion optimale ». Thèse de doctorat, Grenoble, France: Université Grenoble Alpes. <http://www.theses.fr/2016GREAT092>.
- Döll, C., P. Döll, et P. Bots. 2013. « Semi-quantitative actor-based modelling as a tool to assess the drivers of change and physical variables in participatory integrated assessments ». *Environmental Modelling & Software* 46 (août): 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.01.016>.
- Duruiseau, Kévin. 2015. « Le rôle des opérateurs historiques et émergents dans le développement des centrales photovoltaïques au sol dans les territoires méditerranéens français ». *Rives méditerranéennes*, n° 51 (octobre): 99-117. <https://doi.org/10.4000/rives.4955>.
- . 2016. « Transition énergétique et géographie : le photovoltaïque au sol dans le sud de la France ». Thèse de doctorat, Aix-en-Provence, France: Université Aix-Marseille. <http://www.theses.fr/2016AIXM3050>.
- El Beqqali, Omar. 2010. « Unified Modeling Language - Modélisation Objet ». <http://www.mcours.net/cours/pdf/leilcl1c1/leilcl1c39.pdf>.
- Farias, Ignacio, et Thomas Bender. 2010. *Urban Assemblages: How Actor-Network Theory Changes Urban Studies*. Routledge.
- Ferber, Jacques. 1997. *Les systèmes multi-agents: vers une intelligence collective*. 2. tirage. Informatique, intelligence artificielle. Paris, France: InterÉd.
- Fitó, Jaume, Julien Ramousse, Sacha Hodencq, Lou Morriet, Frédéric Wurtz, et Gilles Debizet. 2020. « Analyse technico-économique multi-acteurs de la conception d'un système de

- valorisation de chaleur fatale sur réseau de chaleur ». présenté à Energy communities for collective self-consumption: frameworks, practices and tools, juin 16.
- Franzò, Simone, Federico Frattini, Enrico Cagno, et Andrea Trianni. 2019. « A multi-stakeholder analysis of the economic efficiency of industrial energy efficiency policies: Empirical evidence from ten years of the Italian White Certificate Scheme ». *Applied Energy* 240 (avril): 424-35. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.047>.
- Fuentes-Cortés, Luis Fabián, José María Ponce-Ortega, et Victor M. Zavala. 2018. « Balancing stakeholder priorities in the operation of combined heat and power systems ». *Applied Thermal Engineering* 128 (janvier): 480-88. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.052>.
- Gabillet, Pauline. 2015. « Les entreprises locales de distribution à Grenoble et Metz : des outils de gouvernement énergétique urbain partiellement appropriés ». Thèse de doctorat, Marne-la-Vallée, France: Université Paris-Est. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01357860>.
- Gangat, Yassine, Daniel David, Payet Denis, et Rémy Courdier. 2009. « Modéliser et simuler l'aménagement énergétique d'un territoire par les systèmes multi-agents ». présenté à Convergence des Réseaux, de l'Informatique, et du Multimédia pour les E-Services (CRIMES), Saint Denis de La Réunion, France, octobre 12. https://www.researchgate.net/publication/280851253_Modeliser_et_simuler_l_amenagement_energetique_d_un_territoire_par_les_systemes_multi-agents.
- Gauthier, Benoît. 2009. *Recherche sociale: de la problématique à la collecte des données*. Québec: Presses de l'Université du Québec. https://catalogue.solent.ac.uk/openurl/44SSU_INST/44SSU_INST:VU1?u.ignore_date_coverage=true&rft.mms_id=9997121408104796.
- Gong, Jinlin. 2011. « Modélisation et conception optimale d'un moteur linéaire à induction pour système de traction ferroviaire ». Thèse de doctorat, Lille, France: Ecole centrale de Lille. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00663812>.
- González-Bravo, Ramón, Luis Fabián Fuentes-Cortés, et José María Ponce-Ortega. 2017. « Defining priorities in the design of power and water distribution networks ». *Energy* 137 (octobre): 1026-40. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.079>.
- Grenoble Alpes Métropole. 2018. « Classement du réseau de chaleur ». <http://rcse.fr/wp-content/uploads/2018/03/Annexe-classement-reseau-de-chaleur.pdf>.
- Haddadian, G., N. Khalili, M. Khodayar, et M. Shahidehpour. 2015. « Optimal scheduling of distributed battery storage for enhancing the security and the economics of electric power systems with emission constraints ». *Electric Power Systems Research* 124 (juillet): 152-59. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.03.002>.
- Haghi, Ehsan, Meysam Qadrdan, Jianzhong Wu, Nick Jenkins, Michael Fowler, et Kaamran Raahemifar. 2020. « An iterative approach for optimal decarbonization of electricity and heat supply systems in the Great Britain ». *Energy* 201 (juin): 117611. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117611>.

- Haimès, Y.Y., L.S. Lasdon, et D.A. Wismer. 1971. « On a Bicriterion Formulation of the Problems of Integrated System Identification and System Optimization ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* SMC-1 (3): 296-97. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1971.4308298>.
- Hall, Lisa M. H., et Alastair R. Buckley. 2016. « A review of energy systems models in the UK: Prevalent usage and categorisation ». *Applied Energy* 169 (mai): 607-28. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.044>.
- Hampikian, Zélia. 2017. « De la distribution aux synergies ? : Circulations locales d'énergie et transformations des processus de mise en réseau de la ville ». Thèse de doctorat, Marne-la-Vallée, France: Université Paris Est. <http://www.theses.fr/2017PESC1001>.
- Hampton, Sam. 2018. « Policy implementation as practice? Using social practice theory to examine multi-level governance efforts to decarbonise transport in the United Kingdom ». *Energy Research & Social Science* 38 (avril): 41-52. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.01.020>.
- Haque, A. N. M. M., P. H. Nguyen, F. W. Bliëk, et J. G. Sloopweg. 2017. « Demand response for real-time congestion management incorporating dynamic thermal overloading cost ». *Sustainable Energy, Grids and Networks* 10 (juin): 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2017.03.002>.
- Hart, William E, Jean-Paul Watson, et David L. Woodruff. 2011. « Pyomo: modeling and solving mathematical programs in Python ». *Mathematical Programming Computation* 3 (3), 219-60.
- Hernández-Romero, Ilse María, Luis Fabián Fuentes-Cortés, et Fabricio Nápoles-Rivera. 2019. « Conditions accommodating a dominant stakeholder in the design of renewable air conditioning systems for tourism complexes ». *Energy* 172 (avril): 808-22. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.019>.
- Hettinga, Sanne, Peter Nijkamp, et Henk Scholten. 2018. « A Multi-Stakeholder Decision Support System for Local Neighbourhood Energy Planning ». *Energy Policy* 116 (mai): 277-88. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.02.015>.
- Heuër, Amelie. 2017. « Women-to-women entrepreneurial energy networks: A pathway to green energy uptake at the base of pyramid ». *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 22 (août): 116-23. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.02.020>.
- Hilpert, S., C. Kaldemeyer, U. Krien, S. Günther, C. Wingenbach, et G. Plessmann. 2018. « The Open Energy Modelling Framework (oemof) - A new approach to facilitate open science in energy system modelling ». *Energy Strategy Reviews* 22 (novembre): 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.07.001>.
- Hilpert, Simon. 2016. « The Open Energy Modelling Framework – Genesis, Idea & Concept ». mai 9.
- Hinker, Jonas, Christian Hemkendreis, Emily Drawing, Steven März, Diego I. Hidalgo Rodríguez, et Johanna M. A. Myrzik. 2017. « A novel conceptual model facilitating the

- derivation of agent-based models for analyzing socio-technical optimality gaps in the energy domain ». *Energy* 137 (octobre): 1219-30. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.038>.
- HOAI. 2013. « Honorarordnung Für Architekten Und Ingenieure ». http://www.aknw.de/fileadmin/user_upload/Gesetze/HOAI_2013_AKNW.pdf.
- Hoffman, Kenneth C., et David O. Wood. 1976. « Energy System Modeling and Forecasting ». *Annual Review of Energy* 1 (1): 423-53. <https://doi.org/10.1146/annurev.eg.01.110176.002231>.
- Hollberg, Alexander, Matthias Götz, Thomas Lichtenheld, Philipp Hollberg, Galimshina Alina, et Guillaume Habert. 2019. « Improving the collaboration between architects and energy consultants through design-integrated early BIM tools ». In . Rome.
- Howells, M. I., T. Alfstad, D. G. Victor, G. Goldstein, et U. Remme. 2005. « A model of household energy services in a low-income rural African village ». *Energy Policy* 33 (14): 1833-51. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.02.019>.
- Huang, Zishuo, Hang Yu, Xiangyang Chu, et Zhenwei Peng. 2018. « A novel optimization model based on game tree for multi-energy conversion systems ». *Energy* 150 (mai): 109-21. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.091>.
- Huang, Zishuo, Hang Yu, Zhenwei Peng, et Mei Zhao. 2015. « Methods and tools for community energy planning: A review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42 (février): 1335-48. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.042>.
- Huld, Thomas, Richard Müller, et Attilio Gambardella. 2012. « A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa ». *Solar Energy* 86 (6): 1803-15. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.006>.
- IEA. 2019. « Global Energy and CO2 Status Report 2018 ». *Energy Demand*, mars, 29.
- IPCC. 1990. *Climate change: the IPCC scientific assessment*. Édité par John T. Houghton, G.J. Jenkins, et J.J. Ephraums. New York, Etats Unis: Cambridge University Press.
- . 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Édité par Core Writing Team, R.K. Pachauri, et L.A. Meyer. Genève, Suisse: IPCC.
- Iqbal, M., M. Azam, M. Naeem, A. S. Khwaja, et A. Anpalagan. 2014. « Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (novembre): 640-54. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.120>.
- Jebaraj, S., et S. Iniyar. 2006. « A review of energy models ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10 (4): 281-311. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.004>.

- Junker, Ulrich. 2004. « QUICKXPLAIN: Preferred Explanations and Relaxations for Over-Constrained Problems ». In *AAAI-04*, 167-72. San Jose, Etats Unis. <https://www.aaai.org/Papers/AAAI/2004/AAAI04-027.pdf>.
- Keirstead, James, Mark Jennings, et Aruna Sivakumar. 2012. « A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (6): 3847-66. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.047>.
- Kleppe, Anneke, Jos Warmer, et Wim Bast. 2003. *MDA Explained: The Model Driven Architecture: Practice and Promise*.
- Kong, Deyang, Quhong Xia, Yixi Xue, et Xin Zhao. 2020. « Effects of multi policies on electric vehicle diffusion under subsidy policy abolishment in China: A multi-actor perspective ». *Applied Energy* 266 (mai): 114887. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114887>.
- Lai, Xiaodong, Jixian Liu, et Georgi Georgiev. 2016. « Low carbon technology integration innovation assessment index review based on rough set theory – an evidence from construction industry in China ». *Journal of Cleaner Production* 126 (juillet): 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.035>.
- Latour, Bruno. 1992. *Aramis ou l'amour des techniques*. Textes à l'appui Série anthropologie des sciences et des techniques. Paris, France: La Découverte.
- . 2007. *Changer de société, refaire de la sociologie*. Poche/Sciences humaines et sociales. Paris, France: La Découverte. <https://www.cairn.info/changer-de-societe-refaire-de-la-sociologie--9782707153272.htm>.
- Le Page, Christophe, Géraldine Abrami, Olivier Barreteau, Nicolas Becu, Pierre Bommel, Aurélie Botta, Anne Dray, Claude Monteil, et Véronique Souchère. 2010. *Chapitre 3 - Des modèles pour partager des représentations*. Editions Quæ. <http://www.cairn.info/modelisation-d-accompagnement--9782759206209-page-71.htm>.
- Li, Francis G. N. 2017. « Actors behaving badly: Exploring the modelling of non-optimal behaviour in energy transitions ». *Energy Strategy Reviews* 15 (mars): 57-71. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.01.002>.
- Li, Francis G. N., Evelina Trutnevyte, et Neil Strachan. 2015. « A review of socio-technical energy transition (STET) models ». *Technological Forecasting and Social Change* 100 (novembre): 290-305. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.017>.
- Li, Li Wen, Janine Birmele, Harald Schaich, et Werner Konold. 2013. « Transitioning to Community-owned Renewable Energy: Lessons from Germany ». *Procedia Environmental Sciences*, The 3rd International Conference on Sustainable Future for Human Security, SUSTAIN 2012, 3-5 November 2012, Clock Tower Centennial Hall, Kyoto University, JAPAN, 17 (janvier): 719-28. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.089>.

- Liu, Hu-Chen, Xiao-Yue You, Yi-Xi Xue, et Xue Luan. 2017. « Exploring critical factors influencing the diffusion of electric vehicles in China: A multi-stakeholder perspective ». *Research in Transportation Economics* 66 (décembre): 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2017.10.001>.
- Livian, Yves. 2015. « Initiation à la méthodologie de recherche en SHS : réussir son mémoire ou thèse. » <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01102083/document>.
- Lopez, Fanny. 2019. *L'ordre électrique - Infrastructures énergétiques et territoires*. VuesDensemble. MétisPresses.
- Lopion, Peter, Peter Markewitz, Martin Robinius, et Detlef Stolten. 2018. « A review of current challenges and trends in energy systems modeling ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 96 (novembre): 156-66. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.045>.
- Lund, Henrik, Finn Arler, Poul Østergaard, Frede Hvelplund, David Connolly, Brian Mathiesen, et Peter Karnøe. 2017. « Simulation versus Optimisation: Theoretical Positions in Energy System Modelling ». *Energies* 10 (juin): 840. <https://doi.org/10.3390/en10070840>.
- Lund, Henrik, Poul Alberg Østergaard, David Connolly, Iva Ridjan, Brian Vad Mathiesen, Frede Hvelplund, Jakob Zinck Thellufsen, et Peter Sorknæs. 2016. « Energy Storage and Smart Energy Systems ». *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management* 11 (0): 3-14. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2016.11.2>.
- Magritte, Rene. 1928. *La Trahison des images (Ceci n'est pas une pipe)*. <https://www.wikiart.org/en/rene-magritte/the-treachery-of-images-this-is-not-a-pipe-1948>.
- Manfredi, Massimiliano, Paola Caputo, et Gaia Costa. 2011. « Paradigm shift in urban energy systems through distributed generation: Methods and models ». *Applied Energy* 88 (4): 1032-48. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.018>.
- Marie, Jean-Baptiste. 2019. *Architectes et ingénieurs face au projet*. LE MONITEUR. <https://www.unitheque.com/architectes-ingenieurs-face-projet/le-moniteur/Livre/142714>.
- Markovic, Dragan, Dragan Cvetkovic, et Branislav Masic. 2011. « Survey of software tools for energy efficiency in a community ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (9): 4897-4903. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.014>.
- Measham, Thomas G., David A. Fleming, et Heinz Schandl. 2016. « A conceptual model of the socioeconomic impacts of unconventional fossil fuel extraction ». *Global Environmental Change* 36 (janvier): 101-10. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.12.002>.
- Mendes, Gonçalo, Christos Loakimidis, et Paulo Ferrão. 2011. « On the planning and analysis of Integrated Community Energy Systems: A review and survey of available tools ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (9): 4836-54. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.067>.

- Mermet, Laurent. 2019. « Place et conduite de la négociation dans les processus de décision complexe ». *Negotiations* n° 32 (2): 11-33.
- Morriet, Lou, Gilles Debizet, Benoit Delinchant, et Frédéric Wurtz. en cours de soumission. « Algorithme d'identification de contraintes incompatibles pour les problèmes d'optimisation : application à un projet énergétique ». présenté à IBPSA 2020, Reims.
- Morriet, Lou, Gilles Debizet, et Frédéric Wurtz. 2019. « Multi-Actor Modelling for MILP Energy Systems Optimisation: Application to Collective Self-Consumption ». In *Building Simulation 2019*. Rome. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02285965>.
- Morriet, Lou, Camille Pajot, Benoit Delinchant, Yves Maréchal, Frédéric Wurtz, François Debray, et Benjamin Vincent. 2018. « Optimisation multi-acteurs appliquée à la valorisation de chaleur fatale d'un acteur industriel flexible ». présenté à IBPSA 2018, Bordeaux.
- Morriet, Lou, Frédéric Wurtz, et Gilles Debizet. 2020. « Analyse qualitative pour la modélisation de projets énergétiques locaux ». présenté à Energy communities for collective self-consumption: frameworks, practices and tools, En ligne, juin 16. <https://ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr/scientific-production/energy-community-webinars/session-3-which-skills-and-tools-to-support-energy-communities--845789.htm?RH=1601539548658>.
- Moschetti, Roberta, Helge Brattebø, Kristian Stenerud Skeie, et Anne Gunnarshaug Lien. 2018. « Performing quantitative analyses towards sustainable business models in building energy renovation projects: Analytic process and case study ». *Journal of Cleaner Production* 199 (octobre): 1092-1106. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.091>.
- Müller, Martin. 2015. « Assemblages and Actor-Networks: Rethinking Socio-Material Power, Politics and Space ». *Geography Compass* 9 (1): 27-41. <https://doi.org/10.1111/gec3.12192>.
- Olsthoorn, Dave, Fariborz Haghghat, et Parham A. Mirzaei. 2016. « Integration of storage and renewable energy into district heating systems: A review of modelling and optimization ». *Solar Energy* 136 (octobre): 49-64. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.054>.
- Østergård, Torben, Rasmus L. Jensen, et Steffen E. Maagaard. 2017. « Early Building Design: Informed decision-making by exploring multidimensional design space using sensitivity analysis ». *Energy and Buildings* 142 (mai): 8-22. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.059>.
- Ouhajjou, Abdesselam. s. d. « Méthodes des sciences sociales ». <http://fsjes.usmba.ac.ma/cours/ouhajjou/Methodes-des-sciences-sociales.pdf>.
- Pajot, Camille. 2019. « OMEGAAlpes : outil d'aide à la décision pour une planification énergétique multi-fluides optimale à l'échelle des quartiers ». Thèse de doctorat, Grenoble, France: Université Grenoble Alpes. <http://www.theses.fr/2019GREAT042>.

- Pajot, Camille, Benoit Delinchant, Yves Maréchal, François Debray, Benjamin Vincent, et Frédéric Wurtz. 2017. « Valorisation optimale de chaleur fatale d'un site à très forte consommation électrique ». In *Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Electrique (J CGE)*. Arras.
- Pajot, Camille, Lou Morriet, Sacha Hodencq, Benoît Delinchant, Yves Maréchal, Frédéric Wurtz, et Vincent Reinbold. 2019. « An Optimization Modeler as an Efficient Tool for Design and Operation for City Energy Stakeholders and Decision Makers ». In *Building Simulation 2019*. Rome. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02285954>.
- Pereira, Guillermo Ivan, Jan Martin Specht, Patrícia Pereira Silva, et Reinhard Madlener. 2018. « Technology, business model, and market design adaptation toward smart electricity distribution: Insights for policy making ». *Energy Policy* 121 (octobre): 426-40. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.06.018>.
- Perez, Nicolas, Adélaïde Mailhac, Christian Inard, et Peter Riederer. 2016. « Outil d'aide à la décision multicritère pour la conception de systèmes énergétiques à l'échelle du quartier ». In *Conférence IBPSA France 2016*. Champs-sur-Marne. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4196.3121>.
- Petruny, Loren M., Andrew J. Wright, et Courtney E. Smith. 2014. « Getting it right for the North Atlantic right whale (*Eubalaena glacialis*): A last opportunity for effective marine spatial planning? ». *Marine Pollution Bulletin* 85 (1): 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.004>.
- Pfenninger, Stefan, Adam Hawkes, et James Keirstead. 2014. « Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33 (mai): 74-86. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.003>.
- Pfenninger, Stefan, et Bryn Pickering. 2018. « Calliope: a multi-scale energy systems modelling framework ». *Journal of Open Source Software* 3 (septembre): 825. <https://doi.org/10.21105/joss.00825>.
- Phan, Cécile, et Corentin Plouhinec. 2020. « Chiffres clés des énergies renouvelables - Édition 2020 », juillet, 92.
- Raad, Abbass. 2017. « Co-simulation et optimisation multi-critères en conception de bâtiment, par approche d'interopérabilité de services ». Thèse de doctorat, Grenoble, France: Université Grenoble Alpes. <http://www.theses.fr/2017GREAT103>.
- Ramón González-Bravo, Jürgen Mahlknecht, et Jose Maria Ponce-Ortega. 2018. « Water, Food and Power Grid Optimization at Macroscopic Level Involving Multi-Stakeholder Approach ». *Energy Procedia* 153 (octobre): 347-52. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.013>.
- Recht, Thomas. 2016. « Étude de l'écoconception de maisons à énergie positive ». Thèse de doctorat, Paris, France: PSL Research University. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01545437>.

- Remmen, Peter, Moritz Lauster, Michael Mans, Marcus Fuchs, Tanja Osterhage, et Dirk Müller. 2018. « TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks ». *Journal of Building Performance Simulation* 11 (1): 84–98. <https://doi.org/10.1080/19401493.2017.1283539>.
- Ren, Hongbo, Qiong Wu, Qunzhi Zhu, et Weijun Gao. 2019. « Cost–benefit analysis of distributed energy systems considering multi-benefits and multi-stakeholders ». *Energy* 189 (décembre): 116382. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116382>.
- Reynolds, Jonathan, Muhammad Waseem Ahmad, et Yacine Rezgui. 2018. « Holistic modelling techniques for the operational optimisation of multi-vector energy systems ». *Energy and Buildings* 169 (juin): 397-416. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.065>.
- Ringkjøb, Hans-Kristian, Peter M. Haugan, et Ida Marie Solbrekke. 2018. « A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 96 (novembre): 440-59. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.002>.
- Rodler, Patrick. 2001. « Understanding the QuickXPlain Algorithm: Simple Explanation and Formal Proof ». *ArXiv:2001.01835*, janvier. <http://arxiv.org/abs/2001.01835>.
- Roth, Anastasia. 2019. « Développement de méthodologies génériques pour la conception optimale et durable des parcs hybrides d'énergies renouvelables ». Thèse de doctorat, Toulouse, France: Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT. <https://www.theses.fr/2019INPT0036>.
- Roth, Anastasia, Vincent Gerbaud, Marianne Boix, et Ludovic Montastruc. 2017. « Holistic framework for land settlement development project sustainability assessment: Comparison of El Hierro Island hydro wind project and Sivens dam project ». *Computers & Chemical Engineering* 100 (mai): 153-76. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.02.002>.
- Rydin, Yvonne, Catalina Turcu, Simon Guy, et Patrick Austin. 2013. « Mapping the coevolution of urban energy systems: pathways of change ». *Environment and Planning A* 45 (3): 634 – 649. <https://doi.org/10.1068/a45199>.
- Sánchez-Bautista, Aurora de F., José E. Santibañez-Aguilar, Jannet B. González-Campos, et José María Ponce-Ortega. 2017. « Optimal planning of energy production involving carbon capture systems through a multi-stakeholder scheme ». In *Computer Aided Chemical Engineering*, édité par Antonio Espuña, Moisès Graells, et Luis Puigjaner, 40:1315-20. 27 European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63965-3.50221-X>.
- Santibañez-Aguilar, José Ezequiel, Sergio Castellanos, Antonio Flores-Tlacuahuac, Benjamin B. Shapiro, Douglas M. Powell, Tonio Buonassisi, et Daniel M. Kammen. 2020. « Design of domestic photovoltaics manufacturing systems under global constraints and uncertainty ». *Renewable Energy* 148 (avril): 1174-89. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.010>.

- Schweiger, Gerald, Per-Ola Larsson, Fredrik Magnusson, Patrick Lauenburg, et Stéphane Velut. 2017. « District heating and cooling systems – Framework for Modelica-based simulation and dynamic optimization ». *Energy* 137 (octobre): 566-78. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.115>.
- Shen, Wei, Jing Qiu, et Zhaoyang Dong. 2018. « Electricity network planning targeting Low-Carbon energy transition ». *Global Energy Interconnection* 1 (4): 487-99. <https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.04.009>.
- Sinha, Sunanda, et S. S. Chandel. 2014. « Review of Software Tools for Hybrid Renewable Energy Systems ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32 (avril): 192-205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.035>.
- Star, Susan Leigh. 2010. « Ceci n'est pas un objet-frontière ! » *Revue d'anthropologie des connaissances* Vol 4, n° 1 (1): 18-35.
- Surie, Gita. 2013. « Innovating via emergent technology and distributed organization: A case of biofuel production in India ». *Technological Forecasting and Social Change, World problems, Emerging technologies and Creative Enterprise*, 80 (2): 253-66. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.01.001>.
- SVDU. 2012. « Le livre blanc de l'incinération ». https://www.sccu-colmar.fr/dynamic/pdf/le_livre_blanc_svdu_2012_vf_pdf.pdf.
- Teixeira, Marcos Alexandre, Marcus Luke Murray, et M. G. Carvalho. 2006. « Assessment of land use and land use change and forestry (LULUCF) as CDM projects in Brazil ». *Ecological Economics* 60 (1): 260-70. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.12.003>.
- Terrin, Jean-Jacques. 2014. *Le projet du projet: concevoir la ville contemporaine*. Marseille: Parenthèses.
- Tozzi, Peter, et Jin Ho Jo. 2017. « A comparative analysis of renewable energy simulation tools: Performance simulation model vs. system optimization ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80 (décembre): 390-98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.153>.
- Twaha, Ssenoga, et Makbul A. M. Ramli. 2018. « A review of optimization approaches for hybrid distributed energy generation systems: Off-grid and grid-connected systems ». *Sustainable Cities and Society* 41 (août): 320-31. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.027>.
- Tysiachniouk, Maria S., et Andrey N. Petrov. 2018. « Benefit sharing in the Arctic energy sector: Perspectives on corporate policies and practices in Northern Russia and Alaska ». *Energy Research & Social Science* 39 (mai): 29-34. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.014>.
- Vaisman, Louise, Ghislain Bourg, Benjamin Ploux, Marcela Reinoso, Claire Huberson, et Julie Rieg. 2018. *Les facteurs sociologiques de réussite des projets de transition énergétique*. Paris: IAU Île-de-France.
- Vanhamäki, S., M. Virtanen, S. Luste, et K. Manskinen. 2020. « Transition towards a circular economy at a regional level: A case study on closing biological loops ». *Resources*,

- Vázquez-Canteli, José R., Jérôme Kämpf, Gregor Henze, et Zoltan Nagy. 2019. « CityLearn v1.0: An OpenAI Gym Environment for Demand Response with Deep Reinforcement Learning ». In *Proceedings of the 6th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation*, 356-57. New York NY USA: ACM. <https://doi.org/10.1145/3360322.3360998>.
- Ville de Grenoble. 2013. « Règlement de service; Annexe à la délibération 081-E009 ». Conseil Municipal de Grenoble. <http://archives.grenoble.fr/FrmLotDocFrame.asp?idlot=224969&idfic=0202331&resX=1366&resY=768&init=1>.
- Vinck, Dominique. 2000. *Pratiques de l'interdisciplinarité. Mutations des sciences, de l'industrie et de l'enseignement*.
- . 2009. « De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière ». *Revue d'anthropologie des connaissances* Vol. 3, n° 1 (1): 51-72.
- Wang, Luhao, Bingying Zhang, Qiqiang Li, Wen Song, et Guanguan Li. 2019. « Robust Distributed Optimization for Energy Dispatch of Multi-Stakeholder Multiple Microgrids under Uncertainty ». *Applied Energy* 255 (décembre): 113845. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113845>.
- Wang, Ni, Petra W. Heijnen, et Pieter J. Imhof. 2020. « A multi-actor perspective on multi-objective regional energy system planning ». *Energy Policy* 143 (août): 111578. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111578>.
- Wang, Zhenfeng, Jingzheng Ren, Michael Evan Goodsite, et Guangyin Xu. 2018. « Waste-to-energy, municipal solid waste treatment, and best available technology: Comprehensive evaluation by an interval-valued fuzzy multi-criteria decision making method ». *Journal of Cleaner Production* 172 (janvier): 887-99. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.184>.
- Weber, Céline, François Maréchal, et Daniel Favrat. 2007. « Design and optimization of district energy systems ». In *Computer Aided Chemical Engineering*, édité par Valentin Pleșu et Paul Șerban Agachi, 24:1127-32. 17 European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(07\)80212-4](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(07)80212-4).
- Weber, Michael, Volker Barth, et Klaus Hasselmann. 2005. « A multi-actor dynamic integrated assessment model (MADIAM) of induced technological change and sustainable economic growth ». *Ecological Economics, Technological Change and the Environment*, 54 (2): 306-27. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.12.035>.
- Weijermars, Ruud, Peter Taylor, Olivier Bahn, Subir Ranjan Das, et Yi-Ming Wei. 2012. « Review of models and actors in energy mix optimization – can leader visions and decisions align with optimum model strategies for our future energy systems? » *Energy Strategy Reviews, Energy System Models & Natural Gas Strategies*, 1 (1): 5-18. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2011.10.001>.

- Wurtz, F., P. Kuo-Peng, et E. S. De Carvalho. 2012. « The concept of Imaginary Machines for design and Setting of Optimization Problems: Application to a synchronous generator ». In *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, 1463-68. <https://doi.org/10.1109/ICEIMach.2012.6350071>.
- Wurtz, Frédéric. 2019. *Inventer l'avenir - L'ingénierie se met au vert - Deuxième Chapitre*. CNRS Editions. <https://www.cnrseditions.fr/catalogue/sciences-de-l-ingenieur/inventer-l-avenir/>.
- Yang, Zaoli, Yuanyuan Shi, et Yuchen Li. 2018. « Analysis of intellectual property cooperation behavior and its simulation under two types of scenarios using evolutionary game theory ». *Computers & Industrial Engineering* 125 (novembre): 739-50. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.02.040>.
- Yue, Xiufeng, Steve Pye, Joseph DeCarolis, Francis G. N. Li, Fionn Rogan, et Brian Ó. Gallachóir. 2018. « A review of approaches to uncertainty assessment in energy system optimization models ». *Energy Strategy Reviews* 21 (août): 204-17. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.06.003>.
- Zhu, Shiyao, Dezhi Li, et Haibo Feng. 2019. « Is smart city resilient? Evidence from China ». *Sustainable Cities and Society* 50 (octobre): 101636. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101636>.

Webographie et logiciels – par ordre de mention dans la thèse

- Association négaWatt. Page « La démarche négaWatt ». *négaWatt*. 2016. Consultée en avril 2020. <https://negawatt.org/La-demarche-negaWatt>.
- Cerema. Page « Historique du développement des réseaux de chaleur en France - Réseaux de chaleur et territoires ». *Réseaux de chaleur et territoires*. Juillet 2012. Consultée le 24 avril 2020. <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/historique-du-developpement-des-reseaux-de-chaleur-en-france>.
- . Page « Acteurs des réseaux de chaleur - Réseaux de chaleur et territoires ». *Réseaux de chaleur et territoires*. Janvier 2007. Consultée le 24 avril 2020. <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/acteurs-des-reseaux-de-chaleur>.
- . Page « Cadre d'intervention des collectivités en matière de réseaux de chaleur ». *Réseaux de chaleur et territoires*. Mars 2011. Consultée le 24 avril 2020. <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/cadre-d-intervention-des-collectivites-en-matiere-de-reseaux-de-chaleur>.
- Page « Interactions modeling between buildings and with grid in a district ». *Eco-SESA*. Consultée en février 2020. <https://ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr/research-fronts/interactions-modeling-between-buildings-and-with-grids-in-a-district/>.

- Page « Vidéo sur l’autoconsommation collective d’électricité ». *Eco-SESA*. Consultée en août 2020. <https://ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr/eco-sesa-program/news/video-sur-l-autoconsommation-collective-d-electricite-810496.htm?RH=248563962425208>.
- CPCU. Page « Qui sommes-nous ». *CPCU*. Consultée le 10 février 2020. <https://www.cpcu.fr/nous-connaître/>.
- CCIAG. Page « Histoire ». *Compagnie de chauffage*. Consultée le 10 février 2020. <https://www.compagniedechauffage.fr/2331-histoire.htm>.
- Hespul. Page « Obligation d’achat ». *Photovoltaïque.info*. Avril 2020. Consultée le 3 août 2020. <https://www.photovoltaïque.info/fr/tarifs-dachat-et-autoconsommation/tarifs-dachat/obligation-dachat-pv/>.
- Enedis. Page « Le Mix par Enedis ». *Enedis*. Consultée le 5 août 2020, <https://www.enedis.fr/open-data-le-mix-par-enedis>.
- EDF. Page « Que peut-on faire avec 1 kWh ? ». *EDF France*. 20 juillet 2015. Consultée en avril 2020. <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/que-peut-on-faire-avec-1-kwh>.
- G2Elab. Page « EXPESIGNO ». Consultée en février 2020. <https://g2elab.grenoble-inp.fr/fr/recherche/expesigno-experimentation-de-la-reactivite-des-menages-aux-signaux-des-operateurs-des-systemes-energetiques>.
- RTE. Page « La fiabilité de notre réseau au service de la performance économique ». *RTE France*. 12 septembre 2014. Consultée le 11 février 2020. <https://rte-france.com/fr/article/la-fiabilite-de-notre-reseau-au-service-de-la-performance-economique>.
- Cerema. Page « Foisonnement - Réseaux de chaleur et territoires ». *Réseaux de chaleur et territoires*. Février 2012. Consultée en avril 2020. <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/foisonnement>.
- EDF ENR. Page « Définition kWc, puissance crête, puissance panneau solaire ». *EDF ENR*. Consultée le 13 septembre 2020. <https://www.edfenr.com/lexique/kwc/>.
- Page « Le Projet scientifique - nexus ». Consultée le 13 février 2020. <https://sites.google.com/a/iepg.fr/nexus/projetEQ>.
- Enercoop. Page « Les communautés énergétiques : définition des futurs moteurs européens de la transition énergétique citoyenne ». 6 mai 2020. *Enercoop*. Consultée le 22 juillet 2020. <https://www.enercoop.fr/content/les-communaut-es-energetiques-definition-des-futurs-moteurs-europeens-de-la-transition>.
- Mousseau, Fanny. Page « Agrégateurs : pierre angulaire de la décentralisation énergétique ». *EnergyStream*. 9 janvier 2017. Consultée le 23 juillet 2020. <https://www.energystream-wavestone.com/2017/01/agregateurs-pierre-angulaire-de-decentralisation-energetique/>.

Robiolle, Jérémy. Page « Les agrégateurs dans l'énergie ». 13 juin 2018. Consultée le 22 juillet 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=GoFf4M1eMr0>.

Dalkia. Page « L'agrégateur : un nouveau métier pour le marché électrique ». *Smartgrids-cre*. Consultée le 23 juillet 2020. <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=integrationen-nouveau-metier>.

TRNSYS. Page « TRNSYS, logiciel de simulation thermique des bâtiments et des systèmes ». *Actu-Environnement*. Consultée le 6 avril 2018. <https://www.actu-environnement.com/materiels-services/produit/logiciel-trnsys-cstb-simulation-thermique-batiments-et-systemes-2473.php>.

Artelys. Page « Artelys Crystal Energy Planner ». *Artelys*. Consultée en mai 2016. <https://www.artelys.com/fr/applications/artelys-energy-planner>.

Berkeley Lab. « Distributed Energy Resources - Customer Adoption Model (DER-CAM) | Building Microgrid ». 2018. *Grid Integration Group - Energy Technologies Area*. Consultée en mai 2016. <https://building-microgrid.lbl.gov/projects/der-cam>.

Page « HOMER - Hybrid Renewable and Distributed Generation System Design Software », 2018. *Homer Energy*. Consultée le 14 décembre 2018. <https://www.homerenergy.com/>.

Project Jupyter. 2020. Jupyter Notebook. Logiciel. Consultée le 14 août 2020. <https://www.jupyter.org>.

Audibert, Laurent. Page « UML 2 - de l'apprentissage à la pratique ». *Developpez.com*. Consultée en septembre 2020. <http://laurent-audibert.developpez.com/Cours-UML/>.

Page « Pareto slider ». Consultée en février 2020. <https://pareto-sliders.firebaseio.com/>.

Mitchell J. S. et S. A. Roy. 2020. PuLP 2.2. Logiciel. Python. In *Github*. 23 novembre 2019. Consulté le 6 mars 2020. <https://github.com/coin-or/pulp>.

Free Software Foundation. 2012. GLPK. Logiciel. In *GLPK (GNU Linear Programming Kit)*. 23 juin 2012. Consulté le 6 mars 2020. <https://www.gnu.org/software/glpk/>.

Notebeart Peter et Kjell Eikland. 2020. Lpsolve 5.5.2.9. Logiciel. In *SourceForge*. 13 mars 2020. Consulté le 15 novembre 2020. <https://sourceforge.net/projects/lpsolve/>.

Verger, Guillaume. 2016. Ruby-Cbc. Logiciel. Ruby. In *Github*. Consulté le 15 novembre 2020. <https://github.com/gverger/ruby-abc>.

Berkeley Lab. Page « Modeling Multiple Ownership Microgrids: Use-cases for applying DER-CAM to various microgrid ownership models ». Consulté le 30 novembre 2018. <https://building-microgrid.lbl.gov/sites/default/files/DER-CAM%20Ownership%20Use%20Cases.pdf>.

Elsevier B.V. Page « ScienceDirect ». *ScienceDirect*. Consultée en juillet 2020. <https://www.sciencedirect.com>.

- CPCU. Page « Réseau de chaleur urbain : comment ça marche ? ». *CPCU*. Consultée le 22 avril 2020. <https://www.cpcu.fr/reseau-de-chaleur/>.
- CalcMaps. Page « Calculateur de rayon de carte ». CalcMaps. Consultée en juillet 2020. <https://www.calcmaps.com/fr/map-radius/>.
- Cythelia, page « Cadastre solaire ». Consultée le 7 septembre 2020. <https://grenoble-metropole.cadastre-solaire.fr/?mapCenter=|45.20187683128092|5.702033042907715|&mapZoom=15>.
- Enedis. Page « Mes raccordements – Espace Particulier ». *Enedis*. 2019. Consultée le 7 septembre 2020. <https://mon-compte-particulier.enedis.fr/raccorder/>.
- Enedis. Page « Mon compte Particulier ». *Enedis*. 2019. Consultée le 7 septembre 2020. <https://mon-compte-particulier.enedis.fr/>.
- CRE. Page « Ce qu’il faut savoir pour comprendre l’autoconsommation ». Consultée le 14 octobre 2020. <http://autoconsommation.cre.fr/ce-qu-il-faut-savoir.html>.
- Pacte. Page « Méthodologie ». *Pacte Grenoble*. Consultée en février 2020. <https://www.pacte-grenoble.fr/page/methodologie>.

Textes réglementaires – par ordre de mention dans la thèse

Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.

Loi n° 80-531 du 15 juillet 1980 relative aux économies d’énergie et à l’utilisation de la chaleur.

DIRECTIVE 96/92/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 19 décembre 1996 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l’électricité. JO L 27 du 30/01/1997, p. 20–29.

DIRECTIVE 98/30/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 22 juin 1998 concernant des règles communes pour le marché intérieur du gaz naturel. JO L 204 du 21/07/1998, p. 1–12.

Loi n° 2000-108 du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l’électricité.

MINISTÈRE DE L’ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L’INDUSTRIE, *Arrêté du 8 juin 2001 fixant les conditions d’achat de l’électricité produite par les installations utilisant l’énergie mécanique du vent telles que visées à l’article 2 (2°) du décret n° 2000-1196 du 6 décembre 2000*, Journal officiel, n°143, 22 juin 2001.

MINISTÈRE DE L’ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L’INDUSTRIE, *Arrêté du 13 mars 2002 fixant les conditions d’achat de l’électricité produite par les installations utilisant l’énergie radiative du soleil telles que visées au 3° de l’article 2 du décret n° 2000-1196 du 6 décembre 2000*, Journal officiel, n°62, 14 mars 2002.

Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement.

Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement.

Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.

Ordonnance n° 2016-1019 du 27 juillet 2016 relative à l'autoconsommation d'électricité.

Loi n° 2017-227 du 24 février 2017 ratifiant les ordonnances n° 2016-1019 du 27 juillet 2016 relative à l'autoconsommation d'électricité et n° 2016-1059 du 3 août 2016 relative à la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables et visant à adapter certaines dispositions relatives aux réseaux d'électricité et de gaz et aux énergies renouvelables - Article 9.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER, CHARGÉ DES RELATIONS INTERNATIONALES SUR LE CLIMAT, *Décret n° 2017-676 du 28 avril 2017 relatif à l'autoconsommation d'électricité et modifiant les articles D. 314-15 et D. 314-23 à D. 314-25 du code de l'énergie*, Journal officiel, n°0102, 30 avril 2017.

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE, *Arrêté du 21 novembre 2019 fixant le critère de proximité géographique de l'autoconsommation collective étendue*, Journal officiel, n°0273, 24 novembre 2019.

Ordonnance n° 2016-1725 du 15 décembre 2016 relative aux réseaux fermés de distribution.

Loi n° 2018-493 du 20 juin 2018 relative à la protection des données personnelles (1).

MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE, *arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine*, Journal officiel, n°225, 28 septembre 2006.

Annexes

Annexes

Annexe A Cartographie des revues d'outils, de modèles, d'approches mathématiques et d'algorithmes de résolution pour les systèmes énergétiques

Pour réaliser notre travail de cartographie de métamodeleurs nous avons travaillé à partir de la littérature scientifique existante. Notre démarche nous a amenée à identifier une série d'articles scientifiques réalisant des revues d'outils, de modèles, d'approches mathématiques et d'algorithmes de résolution pour les systèmes énergétiques. Le tableau ci-dessous indique le type de revue proposée par les articles.

Titre	Auteurs et date	Revue scientifique	Revue d'outils	Revue d'approches	Revue de modèles	Revue d'algorithmes / Approche mathématiques
A comparative analysis of renewable energy simulation tools: Performance simulation model vs. system optimization	(Tozzi et Jo 2017)	Renewable and Sustainable Energy Reviews	oui			
A review of approaches to uncertainty assessment in energy system optimization models	(Yue et al. 2018)	Energy Strategy Reviews		oui		oui
A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems	(Connolly et al. 2010)	Applied Energy	oui			
A review of current challenges and trends in energy systems modeling	(Lopion et al. 2018)	Renewable and Sustainable Energy Reviews	oui			
A review of energy models	(Jebaraj et Iniyan 2006)	Renewable and Sustainable Energy Reviews		oui	oui	
A review of energy system models	(Bhattacharyya et Timilsina 2010)		oui		oui	
A review of energy systems models in the UK: Prevalent usage and categorisation	(Hall et Buckley 2016)	Applied Energy	oui			

A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems	(Allegrini et al. 2015)	Renewable and Sustainable Energy Reviews	oui	oui		
A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables	(Ringkjøb, Haugan, et Solbrekke 2018)	Renewable and Sustainable Energy Reviews	oui			
A review of optimization approaches for hybrid distributed energy generation systems: Off-grid and grid-connected systems	(Twaha et Ramli 2018)					oui
A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities	(Keirstead, Jennings, et Sivakumar 2012)	Renewable and Sustainable Energy Reviews		oui	oui	
Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges	(Pfenninger, Hawkes, et Keirstead 2014)	Renewable and Sustainable Energy Reviews	oui	oui		
Holistic modelling techniques for the operational optimisation of multi-vector energy systems	(Reynolds, Ahmad, et Rezgui 2018)	Energy and Buildings			oui	oui
Integration of storage and renewable energy into district heating systems: A review of modelling and optimization	(Olsthoorn, Haghghat, et Mirzaei 2016)	Solar Energy	oui		oui	
Methods and tools for community energy planning: A review	(Huang et al. 2015)	Renewable and Sustainable Energy Reviews	oui	oui		
On the planning and analysis of Integrated Community Energy Systems: A review and survey of available tools	(Mendes, Loakimidis, et Ferrão 2011)	Renewable and Sustainable Energy Reviews	oui			
Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review	(Iqbal et al. 2014)	Renewable and Sustainable Energy Reviews	oui			oui

Outils numériques d'aide à la décision pour la planification territoriale stratégique, l'urbanisme et l'aménagement opérationnel. Comment choisir ?	(ADEME et al. 2016)		oui			
Paradigm shift in urban energy systems through distributed generation: Methods and models	(Manfren, Caputo, et Costa 2011)	Applied Energy	oui	oui	oui	
Review of district-scale energy performance analysis: Outlooks towards holistic urban frameworks	(Aghamolaei et al. 2018)	Sustainable cities and Society		oui		
Review of models and actors in energy mix optimization - can leader visions and decisions align with optimum model strategies for our future energy systems?	(Weijermars et al. 2012)			oui		
Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources	(Abdmouleh et al. 2017)	Renewable Energy				oui
Review of software tools for hybrid renewable energy systems	(Sinha et Chandel 2014)	Renewable and Sustainable Energy Reviews	oui			
Survey of software tools for energy efficiency in a community	(Markovic, Cvetkovic, et Masic 2011)	Renewable and Sustainable Energy Reviews	oui			

Tableau 13 : Classification d'articles scientifiques selon qu'ils proposent des revues d'outils, de modèles, d'approches mathématiques et/ou d'algorithmes de résolution pour les systèmes énergétiques | Source : Auteure

Cette annexe présente une comparaison des deux algorithmes d'identification ComputeISS de Gurobi et LPFICS présentés dans les parties III.3.ii et III.3.iii. Le solveur Gurobi propose un algorithme semblable à LPFICS. Nous avons donc décidé de comparer les performances sur un exemple d'application.

a) Présentation de l'exemple d'application

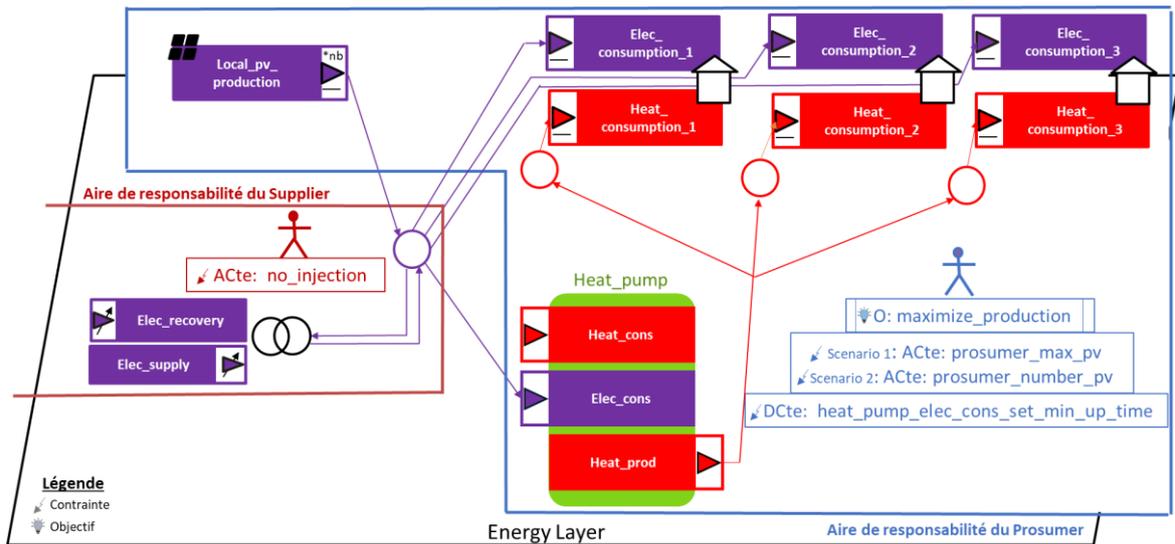


Figure 88 : Représentation graphique du modèle du projet | Source : (Morriet et al. en cours de soumission)

Cette partie présente le cas d'application qui est disponible sous forme de notebook¹¹⁶ et de code python¹¹⁷ sous le nom de 'article_2020_IBPSA_constraint_identification'. La Figure 88 propose une représentation graphique de l'assemblage. Le projet énergétique porte sur trois maisons modélisées par leurs consommations de chaleur (briques *Heat_consumption_1*, *Heat_consumption_2* et *Heat_consumption_3*, données reconstituées car non trouvées en open source) et électriques (briques *Elec_consumption_1*, *Elec_consumption_2* et *Elec_consumption_3*, données agrégées extraites du site Enedis¹¹⁸). Les maisons sont situées en bout de ligne d'un réseau électrique en zone rurale ayant des difficultés d'approvisionnement. Les habitants décident de produire sur place de l'énergie à partir de

¹¹⁶ Le code est disponible ici : https://mybinder.org/v2/git/https%3A%2F%2Fgricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr%2Fomegalpes%2Fomegalpes_examples/masters.

¹¹⁷ Le code est disponible ici : https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/omegalpes/omegalpes_examples/-/tree/master/article_case_study.

¹¹⁸ Enedis, page « Le Mix par Enedis », *Enedis*, consultée le 5 août 2020, <https://www.enedis.fr/open-data-le-mix-par-enedis>.

panneaux photovoltaïques (brique *Local_pv_production*, données extraites du site PVGIS (Huld, Müller, et Gambardella 2012)) installés sur les toitures des maisons et bâtiments annexes et souhaitent maximiser la production. Après une étude rapide de la place disponible, ils peuvent installer au maximum 50 kWc (scénario 1, contrainte : *prosumer_max_pv*) ou décident d'installer les 50 kWc (scénario 2, contrainte : *prosumer_number_pv*). Le fournisseur ne souhaite pas racheter l'énergie produite (contrainte : *no_injection*). Les habitants ont également choisi d'installer une pompe à chaleur (brique *heat_pump*). Les différents systèmes sont reliés via le réseau électrique (brique *elec_node*). Concernant la chaleur, la pompe est reliée à un réseau de chauffage et au réseau d'eau chaude sanitaire des maisons. Les habitants décident de limiter l'allumage de la pompe à chaleur à une fois par heure pour allonger son cycle de vie (contrainte : *heat_pump_elec_cons_on_off_min*). L'étude se porte sur la semaine du 11 au 17 mai 2019 : le chauffage est donc éteint.

b) Comparaison de performances entre les algorithmes d'identification ComputeISS de Gurobi et LPFICS

Nous nous proposons de comparer les temps d'optimisation et d'identification des contraintes pour un même modèle infaisable selon les deux méthodologies LPFICS et ComputeISS, considérant les solveurs respectifs CBC et Gurobi (cf. Tableau 14). Il n'est pas possible d'utiliser le solveur Gurobi dans le cadre de LPFICS, car le solveur ne renvoie pas le statut « infaisable », mais un statut « Non résolu », ne correspondant pas toujours à « infaisable », qui ne permet donc pas d'utiliser LPFICS.

Scénario	Outils utilisés	Temps de résolution	Temps d'identification des contraintes	Contraintes identifiées
S1	LPFICS solver CBC	1,48 s	21,89 s	DCte : dwelling1_heat_node_power_balance_162 DCte: dwelling1_heat_node_power_balance_163 DCte: heat_pump_elec_cons_on_off_max_162 DCte: heat_pump_elec_cons_on_off_min_161 DCte: heat_pump_elec_cons_on_off_min_163 TCte : heat_pump_elec_cons_set_min_up_time_163 DCte heat_pump_elec_cons_def_start_up_161 DCte : heat_pump_conversion_161 DCte : heat_pump_conversion_162 DCte : heat_pump_conversion_163 DCte : dwelling1_heat_node_power_balance_161
S1	ComputeISS solver Gurobi	0,49 s	2,73 s	heat_pump_elec_cons_on_off_max_210 heat_pump_elec_cons_on_off_min_209 heat_pump_elec_cons_on_off_min_211 heat_pump_elec_cons_set_min_up_time_211 heat_pump_elec_cons_def_start_up_209 heat_pump_conversion_210 heat_pump_conversion_211 heat_pump_power_flow_209 dwelling1_heat_node_power_balance_210 dwelling1_heat_node_power_balance_211 dwelling3_heat_node_power_balance_209

Tableau 14 : Comparaison des méthodologies selon les solveurs | Source : Auteure

Dans le cadre du scenario 1, composé de 7740 contraintes et de 4381 variables (2028 continues et 2353 discrètes), on observe que les deux méthodes n'identifient pas les mêmes contraintes, mais le même type de contraintes. Exception faite de la contrainte *heat_pump_power_flow*, qui n'est identifiée que par Gurobi, mais qui est liée aux autres contraintes de la pompe à chaleur identifiées dans les deux cas. Ceci peut s'expliquer par le fait que les algorithmes identifient des lots de contraintes, et non pas toutes les contraintes incompatibles.

On observe également de moins bonnes performances pour LPFICS. Une première explication serait le temps de résolution du solveur. Notre comparaison est en fait limitée par le fait que nous ne pouvons pas utiliser le même solveur, et que le solveur Gurobi a de meilleures performances que le solveur CBC. Dans le cadre de ce projet, l'algorithme LPFICS faisant 68 itérations avant de trouver le système de contraintes, le solveur résout donc 68 modèles (correspondants aux contraintes étudiées). La différence de performances du solveur peut donc jouer un rôle important dans le temps de résolution de l'algorithme. Ces meilleures performances peuvent être notamment liées à un prétraitement des contraintes réalisé au sein du solveur Gurobi.

Dans les deux cas, les contraintes identifiées montrent qu'il est nécessaire de discuter de la contrainte technique liée au temps minimal de fonctionnement de la pompe à chaleur.

c) Identifier les contraintes négociables en premier

Comme nous l'avons dit précédemment, il nous semble nécessaire d'amener les parties prenantes à identifier les contraintes techniques et les contraintes d'acteurs. Pour cela, nous nous sommes appuyée sur la typologie de contraintes implémentée dans OMEGAlpes : contraintes de définition (DCte), contraintes techniques (TCte) et contraintes liées aux acteurs (ACte). L'algorithme sépare alors l'ensemble des contraintes en sous-groupes : définition, techniques, acteurs et autres, dans le cas où certaines contraintes pourraient être ajoutées par le modélisateur sans typage spécifique. Deux autres algorithmes sont alors proposés :

- *find_definition_and_actor_incompatible_constraints_set(your_model)* : qui permet de ne pas prendre en compte les contraintes techniques pour savoir s'il existe des contraintes incompatibles liées aux acteurs.
- *find_definition_and_technical_incompatible_constraints_set(your_model)*: qui permet de ne pas prendre en compte les contraintes liées aux acteurs pour savoir s'il existe des contraintes techniques en conflit.

Les exemples réalisés sur le cas d'étude permettent de montrer que l'algorithme est cohérent dans l'identification des contraintes. Il faudrait chercher à diminuer le nombre de résolutions du modèle et pour cela, une piste serait de trier de manière pertinente les contraintes (cf. Tableau 15). En effet, nos résultats mettent en évidence que les contraintes d'acteurs sont majoritairement infaisables vis-à-vis de contraintes techniques et de définition. Il serait donc intéressant de mélanger ces contraintes dès le début, plutôt que de les séparer.

Contraintes souhaitées	Temps d'identification des contraintes	Nombre de résolution du modèle	Contraintes identifiées
Algorithme basic	15,55	66	1 technique et 10 de définition (cf. tableau 1 ligne 2)
Définition et acteurs	19,34 s	62	3 acteurs et 4 de définition
Définition et techniques	16,29 s	64	2 techniques et 10 de définition

Tableau 15 : Validation de l'identification des contraintes selon le type | Source : Auteure

Annexe C Catégorisation des articles selon la prise en compte des acteurs dans les projets énergétiques

Le tableau ci-dessous recense les types de prise en compte des acteurs dans les projets énergétiques selon les articles identifiés via la recherche par mots clefs sur SciencesDirect.

Titre de l'article	Référence	Considère qu'il existe des acteurs différents autour des projets	Analyse comparative d'études de manière multiacteur	Modèle multiacteur	Intégration de plusieurs acteurs dans le processus de modélisation	Discussion avec des experts sur le processus de modélisation ou le modèle
Mots clefs : energy & model & multi-stakeholder						
A conceptual model of the socioeconomic impacts of unconventional fossil fuel extraction	(Measham, Fleming, et Schandl 2016)	oui	non	non	non	non
A multi-stakeholder analysis of the economic efficiency of industrial energy efficiency policies: Empirical evidence from ten years of the Italian White Certificate Scheme	(Franzò et al. 2019)	oui	oui	non	non	oui
A multi-stakeholder decision support system for local neighbourhood energy planning	(Hettinga, Nijkamp, et Scholten 2018)	oui	non	non	oui	non
Analysis of intellectual property cooperation behavior and its simulation under two types of scenarios using evolutionary game theory	(Yang, Shi, et Li 2018)	oui	non	oui	non	non
An iterative approach for optimal decarbonization of electricity and heat supply systems in the Great Britain	(Haghi et al. 2020)	oui	oui	non	non	non
A novel optimization model based on game tree for multi-energy conversion systems	(Huang et al. 2018)	oui	non	oui	non	non

Assessment of land use and land use change and forestry (LULUCF) as CDM projects in Brazil	(Teixeira, Murray, et Carvalho 2006)	oui	non	non	non	non
A strategic approach to sustainable transport system development - Part 2: the case of a vision for electric vehicle systems in southeast Sweden	(Borén et al. 2017)	oui	non	non	non	oui
Balancing stakeholder priorities in the operation of combined heat and power systems	(Fuentes-Cortés, Ponce-Ortega, et Zavala 2018)	oui	oui	oui	oui	non
Benefit sharing in the Arctic energy sector: Perspectives on corporate policies and practices in Northern Russia and Alaska	(Tysiachniouk et Petrov 2018)	oui	non	non	non	non
Conditions accommodating a dominant stakeholder in the design of renewable air conditioning systems for tourism complexes	(Hernández-Romero, Fuentes-Cortés, et Nápoles-Rivera 2019)	oui	oui	oui	oui	non
Cost-benefit analysis of distributed energy systems considering multi-benefits and multi-stakeholders	(Ren et al. 2019)	oui	oui	non	non	non
Defining priorities in the design of power and water distribution networks	(González-Bravo, Fuentes-Cortés, et Ponce-Ortega 2017)	oui	oui	oui	non	non
Design of domestic photovoltaics manufacturing systems under global constraints and uncertainty	(Santibañez-Aguilar et al. 2020)	oui	non	oui	non	non
Exploring critical factors influencing the diffusion of electric vehicles in China: A multi-stakeholder perspective	(Liu et al. 2017)	oui	non	non	non	oui

Getting it right for the North Atlantic right whale (<i>Eubalaena glacialis</i>): A last opportunity for effective marine spatial planning?	(Petruny, Wright, et Smith 2014)	oui	non	non	non	non
Holistic framework for land settlement development project sustainability assessment: Comparison of El Hierro Island hydro wind project and Sivens dam project	(A. Roth et al. 2017)	oui	non	non	oui	non
Integrated multi-level bioenergy supply chain modelling applied to sugarcane biorefineries in South Africa	(Delval et al. 2016)	oui	non	non	non	non
Is smart city resilient? Evidence from China	(Zhu, Li, et Feng 2019)	oui	non	non	non	non
Low carbon technology integration innovation assessment index review based on rough set theory - an evidence from construction industry in China	(Lai, Liu, et Georgiev 2016)	oui	non	non	non	oui
Optimal planning of energy production involving carbon capture systems through a multistakeholder scheme	(Sánchez-Bautista et al. 2017)	oui	oui	oui	non	non
Optimal scheduling of distributed battery storage for enhancing the security and the economics of electric power systems with emission constraints	(Haddadian et al. 2015)	non	non	non	non	non
Performing quantitative analyses towards sustainable business models in building energy renovation projects: Analytic process and case study	(Moschetti et al. 2018)	oui	non	non	non	non
Robust distributed optimization for energy dispatch of multi-stakeholder multiple microgrids under uncertainty	(L. Wang et al. 2019)	oui	non	oui	non	non

Sustainability and governance of sugarcane ethanol companies in Brazil: Topic modeling analysis of CSR reporting	(Benites-Lazaro, Giatti, et Giarolla 2018)	oui	non	non	non	non
Technology, business model, and market design adaptation toward smart electricity distribution: Insights for policy making	(Pereira et al. 2018)	oui	non	non	non	oui
Transition towards a circular economy at a regional level: A case study on closing biological loops	(Vanhamäki et al. 2020)	oui	non	non	non	non
Water, food and power grid optimization at macroscopic level involving multi-stakeholder approach	(Ramón González-Bravo, Jürgen Mahlke, et Jose Maria Ponce-Ortega 2018)	oui	oui	non	non	non
Women-to-women entrepreneurial energy networks: A pathway to green energy uptake at the base of pyramid	(Heuër 2017)	oui	non	non	non	non

Mots clefs : energy & model & multi-actor

Actors behaving badly: Exploring the modelling of non-optimal behaviour in energy transitions	(F. G. N. Li 2017)	oui	oui	oui	non	non
A multi-actor dynamic integrated assessment model (MADIAM) of induced technological change and sustainable economic growth	(M. Weber, Barth, et Hasselmann 2005)	oui	oui	oui	non	non
A multi-actor perspective on multi-objective regional energy system planning	(N. Wang, Heijnen, et Imhof 2020)	oui	oui	oui	non	non

A novel conceptual model facilitating the derivation of agent-based models for analyzing socio-technical optimality gaps in the energy domain*	(Hinker et al. 2017)	oui	non	oui	non	oui
Demand response for real-time congestion management incorporating dynamic thermal overloading cost	(Haque et al. 2017)	oui	non	non	non	non
Early Building Design: Informed decision-making by exploring multidimensional design space using sensitivity analysis	(Østergård, Jensen, et Maagaard 2017)	oui	non	non	oui	non
Effects of multi policies on electric vehicle diffusion under subsidy policy abolishment in China: A multi-actor perspective	(Kong et al. 2020)	oui	oui	oui	non	non
Innovating via emergent technology and distributed organization: A case of biofuel production in India	(Surie 2013)	oui	non	non	non	non
Policy implementation as practice? Using social practice theory to examine multi-level governance efforts to decarbonise transport in the United Kingdom	(Hampton 2018)	oui	non	non	non	non
Transitioning to community-owned renewable energy: Lessons from Germany	(L. W. Li et al. 2013)	oui	non	non	non	non
Waste-to-energy, municipal solid waste treatment, and best available technology: Comprehensive evaluation by an interval-valued fuzzy multi-criteria decision making method	(Z. Wang et al. 2018)	oui	oui	non	oui	non

Tableau 16 : La prise en compte des parties prenantes dans les projets énergétiques : classification d'articles scientifiques selon le mode de prise en compte | Source : Auteure

Annexe D Représentations graphiques d'assemblages socio-énergétiques

Ci-dessous, deux représentations graphiques pour les assemblages socio-énergétiques. S'appuyant sur la théorie des assemblages (cf. I.2.iv) appliquée à la ville, Guy, dans (Rydin et al. 2013), propose une représentation graphique du système énergétique du réseau de chauffage urbain à l'eau de mer de La Hague. La représentation met en évidence :

- les technologies (acteurs non-humain dans la légende),
- les acteurs humains et organisations. L'équivalent de leur périmètre de responsabilité est représenté par des flèches en pointillé.
- La gouvernance
- Les idées et concepts associés aux différentes parties du projet
- Les « enablers », source qui permet le projet, la mer en l'occurrence.

Il nous semble manquer dans cette représentation les flux d'énergie tels que la chaleur fournie aux habitants.

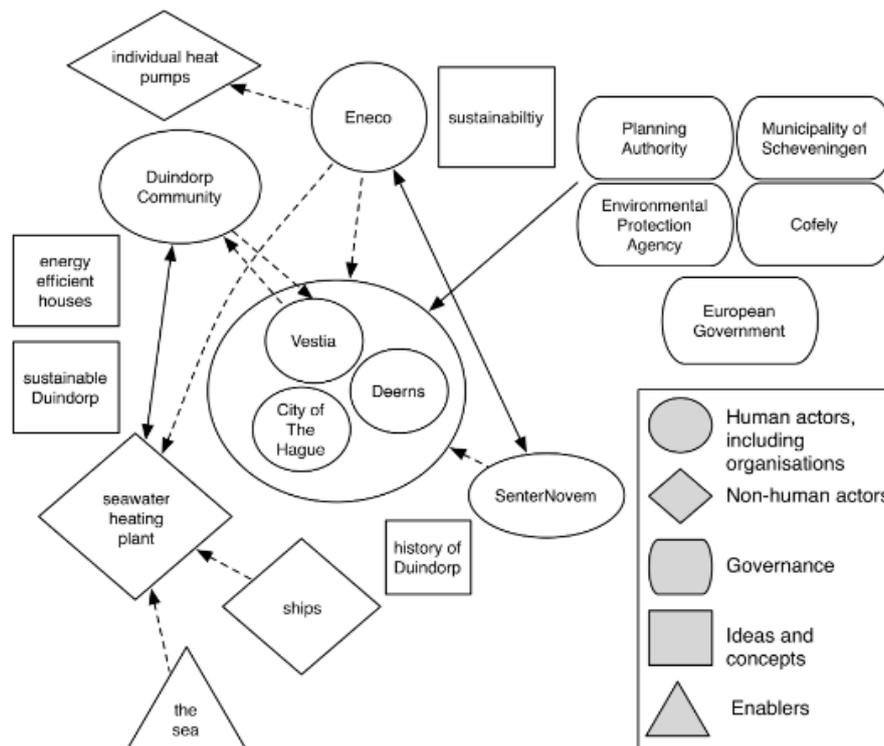


Figure 89 : Représentation du système énergétique du réseau de chaleur urbain à base d'eau de mer à partir de la théorie des acteurs réseaux et des assemblages urbains | Source : Simon Guy (Rydin et al. 2013)

(Debizet, Yalçın-Riollet, et Tabourdeau 2018) font une autre proposition de représentation graphique d'un assemblage socio-énergétique. S'appuyant sur la théorie des assemblages et des nœuds socio-énergétiques (cf. I.2.iv et I.3.iii.a), ils représentent le réseau de chaleur de Fontaine. La représentation met en évidence :

- les systèmes de production et de consommation d'énergies représentés par des carrés,
- les flux d'énergies représentés par des flèches, à l'instar de la représentation RES et de celle proposée par (Pajot 2019) (cf. II.4.i),
- les ressources et les vecteurs énergétiques par des couleurs,
- les différentes échelles du système énergétique en fonction des vecteurs énergétiques,
- les acteurs humains tels que le fournisseur d'électricité (indiqué en bleu) et le gestionnaire du réseau de chaleur, ainsi que leur périmètre de responsabilité représentés par leur nom le long des flux,
- la taille représente l'influence de l'acteur dans les décisions.

Il s'agit d'une représentation très complète qui dépasse ce que nous proposons de modéliser dans le cadre de cette thèse.

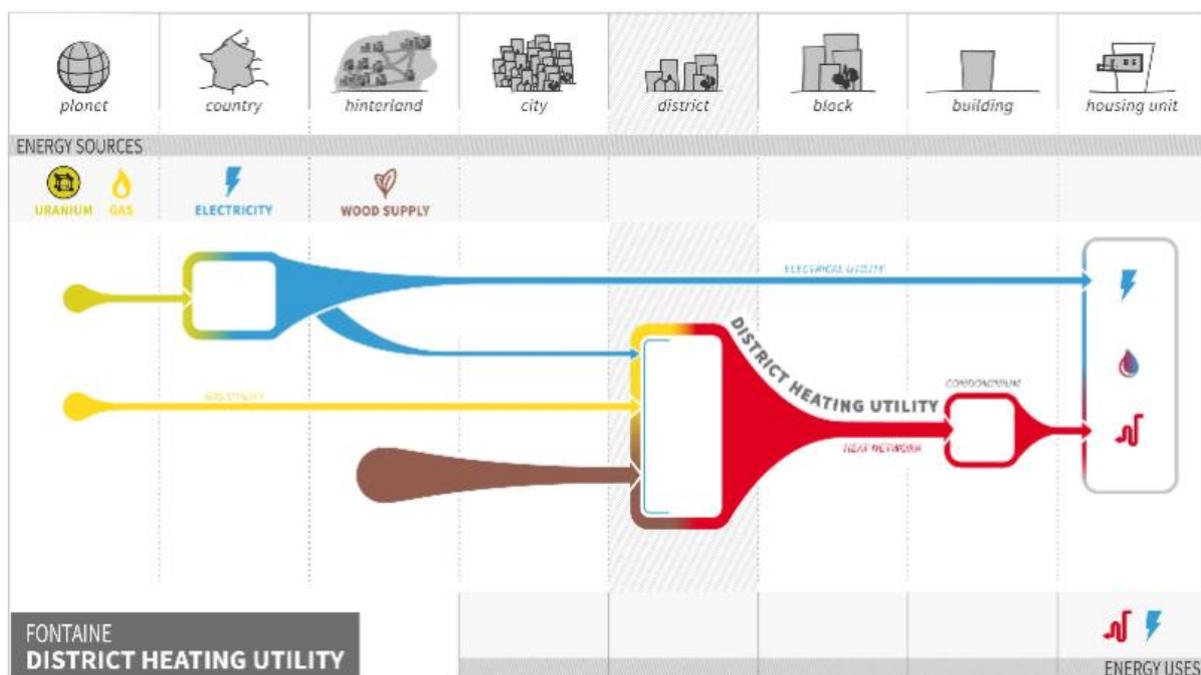


Figure 90 : Représentation graphique du système énergétique du réseau de chaleur de Fontaine | Source : (Debizet, Yalçın-Riollet, et Tabourdeau 2018)

a) Présentation du terrain

Le projet d'autoconsommation collective de Smartmagne est étudié par (Aubert 2020) en phase de conception. Le projet est porté par le maire de la ville de Marmagne, également président du Syndicat Départemental d'Energie du Cher SDE18, et Omexom la filiale de Vinci Energies. Un troisième acteur « contraint » intervient directement sur la conception du projet : le gestionnaire de réseau d'électricité Enedis.

Ce projet envisage de cumuler deux types d'autoconsommation : la première est de l'autoconsommation individuelle portant sur les bâtiments de la commune regroupés sous un unique compteur, la seconde est de l'autoconsommation collective, associant alors les riverains pour de la consommation et/ou la production. Le nombre de riverains envisageables et envisagés évolue au cours du projet en fonction des évolutions légales portant sur le périmètre de l'autoconsommation collective. Le SELBC regroupe donc les deux systèmes d'autoconsommation (cf. Figure 91 autoconsommation individuelle en rouge et autoconsommation collective en bleu). L'installation photovoltaïque envisagée serait de 220 kWc installés sur les toits des bâtiments communaux. Elle pourrait être complétée par des panneaux photovoltaïques installés sur le toit de riverains.

Aujourd'hui le projet semble abandonné. Une explication serait un courrier de la préfecture du Cher invitant la commune (ayant alors un nouveau maire) à vérifier les apports de la commune (minimum 20%) pour vérifier la légalité du montage du projet.



Figure 91 : Représentation spatialisée du projet d'autoconsommation collective à Marmagne | Source : (Aubert 2020)

b) Résultats de l'analyse qualitative pour le projet d'autoconsommation collective à SmartMagne

La requête réalisée pour le projet SmartMagne sur Nvivo permet d'extraire les contraintes et les objectifs par type d'acteurs, comme le montre la Figure 92.

	A : RI_CO_Contraintes non quantitatives ▼	B : RI_CO_Contraintes quantitatives ▼	C : RI_CO_Objectifs non quantitatifs ▼	D : RI_CO_Objectifs quantitatifs ▼	E : RI_Raisons-influentes-autres ▼
1 : Ac_Agrégateurs ▼	0	0	0	0	0
2 : Ac_Aménageurs ▼	0	0	0	0	0
3 : Ac_Architectes ▼	0	0	0	0	0
4 : Ac_Autorités-régulatrices-extérieures... ▼	11	5	0	0	12
5 : Ac_Autorités-régulatrices-locales ▼	2	1	1	1	16
6 : Ac_Chargé_maintenance ▼	0	0	0	0	0
7 : Ac_Concepteurs-solutions ▼	8	2	2	5	38
8 : Ac_Consommateurs ▼	0	2	1	2	10
9 : Ac_Développeurs ▼	7	1	3	2	34
10 : Ac_Financeurs ▼	0	1	0	0	2
11 : Ac_Fournisseurs ▼	0	0	0	0	0
12 : Ac_Gestionnaires-réseaux-chaleur ▼	0	0	0	0	0
13 : Ac_Gestionnaires-réseaux-elec-gaz ▼	7	1	3	2	10
14 : Ac_Installateurs ▼	0	0	0	0	0
15 : Ac_Éléments-naturels ▼	0	0	0	0	1
16 : Ac_Prescripteurs ▼	0	0	0	0	0
17 : Ac_Producteurs-exploitants ▼	0	0	0	0	2
18 : Ac_Propriétaires ▼	0	0	0	0	0
19 : Ac_Prosumers ▼	0	0	0	3	1
20 : Ac_Riverains ▼	0	0	0	0	4
21 : Ac_Stockeurs ▼	0	0	0	4	0
22 : Ac_VRAC ▼	1	0	1	1	9

Figure 92 : Tableau de répartition des citations et verbatims portant sur les raisons influentes en fonction des types d'acteurs pour le cas d'étude de Marmagne | Source : Auteure - extrait de Nvivo

A l'instar du travail réalisé dans le chapitre V (cf. V.3), nous présentons dans cette partie les raisons influentes par type d'acteurs. Aucun acteur portant le rôle d'agrégateur, d'aménageur, d'architecte, de chargé de maintenance, de fournisseur, de gestionnaires de réseau de chaleur et de gaz, d'installateur, ou encore de prescripteur n'a été identifié pour ce projet.

Autorités régulatrices extérieures au projet

L'autorité régulatrice extérieure au projet, principalement identifiée dans ce projet, est la législation française. Dans sa thèse, (Aubert 2020) valide l'importance de considérer l'autorité régulatrice extérieure au projet, qu'elle nomme législateur. Ainsi, elle écrit : « Comme l'avait mentionné le directeur technique Omexom en décembre 2017, il faut considérer le législateur comme un actant à part entière ». Aucun objectif n'est identifié, mais de nombreuses contraintes le sont, notamment sur la définition de l'autoconsommation collective. « En plus de définir le périmètre technique, et donc spatial, d'une opération d'AC, la loi précise un ensemble de règles et de modalités concernant la fourniture de l'électricité, sa tarification, les conditions de l'injection sur le réseau public, le rôle de chaque acteur dans le calcul administratif des kWh autoconsommés collectivement. Ces modalités sont précisées dans un décret datant du 28 avril 2017 : quelle organisation administrative réaliser ; quelles modalités de calculs des coefficients de répartition sont possibles ; quelles sont les missions du gestionnaire de réseau de distribution ; quelle interaction technique d'un projet d'AC avec le réseau (limites d'injection, surplus gratuit pour le responsable d'équilibre selon la puissance installée) » (Aubert 2020).

Contrainte portée quantitative : Périmètre restreint pour l'autoconsommation collective

Comme présenté dans la section V.2.i.a, le périmètre d'un projet d'autoconsommation collective est limité, en 2017, à l'antenne basse tension d'un poste de distribution. Dans le cadre de Smartmagne, cette contrainte est importante. « Selon le directeur interrogé, le législateur permet l'expérimentation de Smartmagne, tout en la contraignant via la définition de son périmètre. Le projet de Smartmagne est une occasion de « valider le texte du législateur » (entretien avec le directeur technique Omexom, 19/12/17). En effet, le texte de loi **contraint** deux éléments dans le projet. Techniquement, il **restreint**

l'opération à un seul poste HTA/BT, alors qu'il en existe deux dans le centre-bourg de Marmagne » (Aubert 2020).

Contrainte portée quantitative : TURPE spécifique

Le Tarif d'Utilisation des Réseaux Publics d'Électricité (TURPE) est également défini par l'Etat. Dans le cadre des projets d'autoconsommation collective, un TURPE spécifique réduit est possible, mais il reste non nul. Indique « la définition d'un TURPE spécifique, élaboré par la CRE, **impacte** la rentabilité d'un projet » (Aubert 2020).

Contrainte portée quantitative : Cofinancement limité pour une commune

Les communes doivent autofinancer une partie des investissements. Ainsi, il est indiqué qu'« un courrier de la préfecture du Cher serait à l'origine de la remise en cause du projet. Le courrier « invite la commune à vérifier que le plan de financement prévu **respectait** bien la part d'autofinancement de la commune à hauteur de 20 % hors taxe des subventions publiques » (Le Berry Républicain, 04/07/19) » (Aubert 2020).

Contrainte portée non quantitative : Travailler avec Enedis

Dans la définition des projets d'autoconsommation collective, l'État oblige que le projet soit géré en partie avec le gestionnaire du réseau local, majoritairement Enedis, sur le territoire français. Ainsi, il est indiqué : « L'intégration **obligatoire** d'Enedis, en tant que gestionnaire du réseau de distribution de cette zone, est prévue dans la loi » (Aubert 2020).

Contrainte portée non quantitative : Interdiction de développer un réseau fermé

Le statut des réseaux fermés s'est récemment clarifié, interdisant le recours à un réseau fermé dans le cadre d'habitations. Ainsi, il est explicité : « En parallèle, le verdict de la cour de Paris sur le cas de ValSophia est rendu. **Interdisant** la structure du réseau telle qu'elle est proposée dans ce projet, ceci met en péril toutes les colonnes montantes électriques des bâtiments de bureaux. Pour remédier à cette problématique, un projet de décret sur les réseaux intérieurs est introduit dans le projet de loi sur la fin de la recherche et de l'exploitation des hydrocarbures (septembre et octobre 2017) » (Aubert 2020).

Contrainte portée non quantitative : Déclaration obligatoire du réseau électrique privé et des installations de production

Il est également obligatoire de déclarer le réseau électrique privé construit par la mairie à Enedis, ainsi que les installations de production. Ainsi, il est indiqué : « Concernant les procédures, le réseau électrique construit **devra** être déclaré (cartographié) via une DICT (déclaration d'intention de commencement de travaux), afin de mettre à jour les cartes concernant les réseaux enfouis (procédure en ligne en données ouvertes) ». « Et, l'ensemble des installations de production (batterie incluse) **devra** être déclaré à ENEDIS, en indiquant notamment les seuils d'injection et de soutirage » (Aubert 2020).

Autorités régulatrices locales

Une des autorités régulatrices locales dans le cadre du projet de SmartMagne est le Maire de la ville de Marmagne. Ce dernier est également le président du Syndicat Départemental d'Énergie du Cher SDE18. Surtout, il est l'un des deux développeurs du projet SmartMagne. C'est pourquoi nous avons dû distinguer dans l'analyse les raisons influentes liées au développeur, de celles liées au rôle de régulateur local. Nous avons associé le rôle de régulateur local aux termes de « maire », de « collectivité »... ce qui n'est cependant pas assez restrictif.

Objectif non quantitatif : Intérêt pour l'environnement et la transition énergétique

Le directeur Enedis du département Collectivités et Territoires identifie un intérêt des collectivités pour l'environnement et la transition énergétique. Ainsi, selon lui, les collectivités ont « *sans doute une grande part d'intérêt pour l'environnement et cette transition dont nous parlons* » (entretien avec le directeur Enedis du département Collectivités et Territoires, 10/01/18) » (Aubert 2020). Bien que cet objectif corresponde principalement au rôle de développeur de SELBC, il pourrait également y avoir des réglementations associées à cet intérêt, mais nous n'en avons pas identifié dans la monographie.

Concepteur solution

Le concepteur solution Omexom est également un des porteurs du projet SmartMagne. Les raisons influentes identifiées dans Nvivo correspondent donc aux choix pris par les développeurs (voir la section Développeurs).

Consommateurs

Les consommateurs sont à la fois la mairie elle-même - il s'agit de « couvrir la demande en énergie des bâtiments communaux, de l'éclairage public de la zone et de bornes de recharge pour véhicules électriques » - et les habitants de Marmagne. Cependant, ces derniers sont très peu consultés vis-à-vis du projet d'autoconsommation collective. Avec l'augmentation du périmètre, le projet passe d'« une vingtaine d'habitant.e.s de Marmagne » à « 61 consommateur.ice.s potentiel.le.s ».

Développeurs

Le projet Smartmagne est porté par deux acteurs : le maire de la ville de Marmagne, également président du Syndicat Départemental d'Énergie du Cher SDE18, et Omexom la filiale de Vinci Énergies. (Aubert 2020) parle de « tandem entre une entreprise et une collectivité ».

Objectif quantitatif : Maximiser l'autoconsommation des bâtiments

Un objectif porté par les développeurs consiste à maximiser l'autoconsommation des bâtiments publics. (Aubert 2020) explique que la forme du SELBC envisagé correspond à cet objectif. « Cette conception technique [du projet SmartMagne] répond au besoin de maximiser l'autoconsommation des bâtiments publics dans leur ensemble ». Bien que le terme « besoin » soit employé, il s'agit bien d'un objectif exprimé.

Objectif non quantitatif : Avoir un projet démonstrateur

Pour les deux développeurs, le maire de Marmagne, également président du Syndicat Départemental d'Énergie du Cher, et l'entreprise Omexom, filiale de Vinci, il y a un souhait de développer un projet démonstrateur. (Aubert 2020) explique : « Le village de Marmagne **a été choisi** par le président du Syndicat Départemental d'Énergie du Cher (SDE 18) comme démonstrateur pour mettre en œuvre plusieurs ambitions, techniques, sociales et économiques, autour d'un projet électrique communal, celui de l'autoconsommation collective d'électricité photovoltaïque ». Une élue de Marmagne exprime, selon elle, l'intérêt de Vinci : « *VINCI c'est clair et net, [...] ils ont tarabusté Aymar à ce sujet [...] ce sera pour eux un démonstrateur, une vitrine. C'est évident !* » (entretien avec une élue de Marmagne, en charge des finances, 15/01/18).

Objectif quantitatif : Rentabiliser le projet

Une contrainte portée par l'un des développeurs, le maire de Marmagne, est de développer un projet rentable. (Aubert 2020) explique : « Comme le prix d'un kWh soutiré est supérieur à celui d'un kWh injecté, l'opération devient rentable pour la commune après un certain temps de retour sur investissement (coût du nouveau réseau, du stockage et des panneaux PV à amortir). Cette **logique** technico-économique a guidé la conception du projet ».

Contrainte portée quantitative : Ne pas perdre de l'argent

L'objectif présenté précédemment peut également être considéré comme une contrainte. Ainsi, le maire explique qu'il ne veut pas perdre de l'argent : « *je ne suis pas kamikaze. [...] je veux bien faire un test, je ne demande pas à gagner de l'argent, mais **je ne veux pas** en perdre non plus* » (Aubert 2020). On retrouve cette contrainte pour l'industriel dans le cas de la valorisation de chaleur à Dunkerque.

Financeurs

Les financeurs sont identifiés dans la monographie du projet (Aubert 2020, 370). Ainsi, en se basant sur Le Berry Républicain du 04/07/19, Aubert présente un financement basé sur une dotation de soutien à l'investissement local (DSIL), une dotation d'équipement des territoires ruraux (DETR), des financements de la région, du département, de la commune et du Syndicat départemental d'énergie du Cher, de In Energies (reversement Démonstrateurs industriels pour la ville durable) et de Bourges Plus, ainsi que des financements privés de Vefiorn et de In Energies. Aucune influence de ces acteurs n'a été identifiée, à part pour la mairie qui est également développeur.

Contrainte portée quantitative : Ne pas perdre d'argent

Le maire ne veut pas perdre de l'argent, ou en faire perdre à la commune, avec ce projet. Ainsi, il explique « *je ne suis pas kamikaze. [...] je veux bien faire un test, je ne demande pas à gagner de l'argent, mais **je ne veux pas** en perdre non plus* » (Aubert 2020). On retrouve cette contrainte pour l'industriel dans le cas de la valorisation de chaleur à Dunkerque.

Le gestionnaire du réseau d'électricité sur la ville de SmartMagne est Enedis. Trois objectifs et une contrainte sont identifiés :

Objectif quantitatif : Multiplier les projets

Un objectif pour Enedis est de pouvoir réaliser et accompagner de nombreux projets d'autoconsommation collective. Ainsi (Aubert 2020) écrit : « L'objectif, pour Enedis, est, in fine, la multiplication réelle et conséquente de tels projets. Enedis est une organisation qui a vocation, dans ses fonctions, à réaliser de l'industrialisation automatisée massive ».

Objectif non quantitatif : Protéger l'environnement

Un autre objectif pour développer les projets d'autoconsommation collective, d'après une chargée de mission Enedis, serait la lutte contre la précarité. (Aubert 2020) indique : « Ainsi, d'après la chargée de mission territoriale Enedis, comme il y a aujourd'hui très peu de recul sur le modèle économique de l'[autoconsommation collective], les deux principales **motivations** d'Enedis pour les projets d'AC sont l'environnement et la lutte contre la précarité énergétique (entretien avec une chargée de mission Enedis, 09/02/18) ».

Objectif non quantitatif : Lutter contre la précarité énergétique

Au-delà de la lutte contre la précarité, d'après une chargée de mission Enedis, Enedis aurait comme objectif de protéger l'environnement. Nous nous basons sur la même phrase : « Ainsi, d'après la chargée de mission territoriale Enedis, comme il y a aujourd'hui très peu de recul sur le modèle économique de l'[autoconsommation collective], les deux principales **motivations** d'Enedis pour les projets d'AC sont l'environnement et la lutte contre la précarité énergétique (entretien avec une chargée de mission Enedis, 09/02/18) » (Aubert 2020).

Contrainte portée quantitative : Déployer les compteurs Linky en avance

Une contrainte portée par Enedis et la date du déploiement des compteurs Linky dans la commune de Marmagne. Cette période a apparemment été avancée. Nous pouvons supposer que ce soit à la demande de la commune. Ainsi, (Aubert 2020) indique : « Enedis a avancé le déploiement des compteurs Linky sur la commune de Marmagne [dans l'expectative de l'opération d'autoconsommation collective] ».

Prosumers

Objectif quantitatif : Minimiser la facture d'électricité

Un objectif financier est identifié pour les prosumers. Il s'agit de baisser la facture d'électricité que nous pouvons traduire en minimiser la facture d'électricité pour reprendre des termes d'optimisation. Cet objectif a été identifié à partir de la phrase suivante : « Ainsi, **l'intérêt** financier d'une baisse de leur facture parce qu'ils autoconsomment des kWh moins chers que leur abonnement habituel diminue » (Aubert 2020).

Objectif quantitatif : Couvrir la demande en énergie

Un autre objectif consiste à couvrir la demande en énergie des consommations. C'est notamment vis-à-vis de cet objectif qu'est dimensionnée l'installation. Ainsi, en se basant sur le dossier de candidature DIVD de Smartmagne, (Aubert 2020) indique : « il est prévu **d'expérimenter** avec la mise en place : « [d]'une production d'énergie renouvelable suffisante sur des bâtiments communaux pour couvrir la demande en énergie des bâtiments communaux, de l'éclairage public de la zone et de bornes de recharge pour véhicules électriques (IRVE) (...) (dossier de candidature DIVD de Smartmagne, Omexom, 2017) ». Un stockage est également envisagé.

Riverains

Raison influente autre : Intégration ou non des riverains en tant que prosumer

Dans le cadre d'un SELBC, les riverains peuvent être des personnes d'intérêt pour le projet, car ils peuvent potentiellement devenir *prosumers* du projet. Il s'agit d'un changement radical par rapport aux projets plus « classiques ». Ce changement est mis en évidence par (Aubert 2020), qui indique : « pour le directeur technique d'Omexom, « l'intégration de la population est un sujet inattendu » (entretien avec le directeur technique d'Omexom, 12/19/17). Le fait d'intégrer la population est considéré à ce stade car elle est nécessaire pour réaliser une opération d'autoconsommation collective ».

Stocker

Aucun acteur n'est associé au rôle de stockeur. En revanche, un stockage est envisagé dans le projet, et plusieurs objectifs peuvent être identifiés en lien avec ce rôle, via le dossier de candidature DIVD de Smartmagne.

Objectif quantitatif : Couvrir les besoins des consommations

Le stockage est en effet dimensionné « pour couvrir les besoins en électricité des bâtiments participants à l'opération, de l'IRVE et de l'éclairage public de proximité » (Aubert 2020).

Objectif quantitatif : Couvrir les besoins lorsque la production locale est faible

Le stockage est en effet dimensionné « pour subvenir aux besoins les jours où la production d'énergie renouvelable serait trop faible ou absente » (Aubert 2020).

Objectif quantitatif : S'effacer du réseau

Le stockage est en effet dimensionné « pour s'effacer du réseau, pour décaler certains pics et lisser, voire décaler la charge » (Aubert 2020).

Éléments naturels

Raison influente autre :

Nous avons identifié que « la production PV est la plus importante lors des deux mois d'été » (Aubert 2020). Cet exemple permet de montrer ce qui peut être identifié au sein de la catégorie « raison influente autre »

c) Synthèse des contraintes et objectifs identifiés

	Objectifs	Contraintes
Autorités extérieures au projet		<ul style="list-style-type: none"> - Périmètre restreint de l'autoconsommation collective - TURPE spécifique - Co-financement limité pour une commune - Travailler avec Enedis - Interdiction de développer un réseau fermé - Déclaration obligatoire du réseau électrique privé et des installations de production
Autorités locales	- Intérêt pour l'environnement et la transition énergétique	
Concepteurs solution		
Consommateurs		
Développeurs	<ul style="list-style-type: none"> - Maximiser l'autoconsommation des bâtiments - Avoir un projet démonstrateur - Rentabiliser le projet 	- Ne pas perdre d'argent
Financeurs	- Ne pas perdre d'argent	
Gestionnaires réseau électricité	<ul style="list-style-type: none"> - Multiplier les projets - Protéger l'environnement - Lutter contre la précarité énergétique 	- Déployer les compteurs Linky en avance
Prosumers	<ul style="list-style-type: none"> - Minimiser la facture d'électricité - Couvrir la demande en énergie 	
Riverains		
Stockeurs	<ul style="list-style-type: none"> - Couvrir les besoins des consommations - Couvrir les besoins lorsque la production locale est faible - S'effacer du réseau 	
Éléments naturels		

Tableau 17 : Synthèse des contraintes et objectifs identifiés pour le projet d'autoconsommation collective de Marmagne |
Source : Auteurs

a) Présentation du terrain

Le SELBC est cette fois-ci porté par une communauté d'habitants regroupés en tant que collectif autour d'un habitat participatif. Le projet est localisé dans le sud de la France et regroupe onze ménages. Le collectif souhaite développer un système de partage d'électricité photovoltaïque produite sur place. Un second acteur majeur intervient dans la conception du projet : il s'agit également du gestionnaire de réseau d'électricité Enedis.

Tout d'abord, un premier projet d'échange d'énergie en direct a été envisagé. Impossible vis-à-vis de la loi, un projet d'autoconsommation collective est alors envisagé avec de l'autoconsommation directe pour les communs et les chauffe-eaux (cf. Figure 93). 15,9 kWc ont été installés en ombrières.

Aujourd'hui le projet est en fonctionnement. L'analyse des assemblages considéré en fonction des contraintes et objectifs des acteurs a fait l'objet d'un article et d'une présentation (Morriet, Wurtz, et Debizet 2020) dans la conférence « Energy communities for collective self-consumption: frameworks, practices and tools » portée par Eco-SESA.

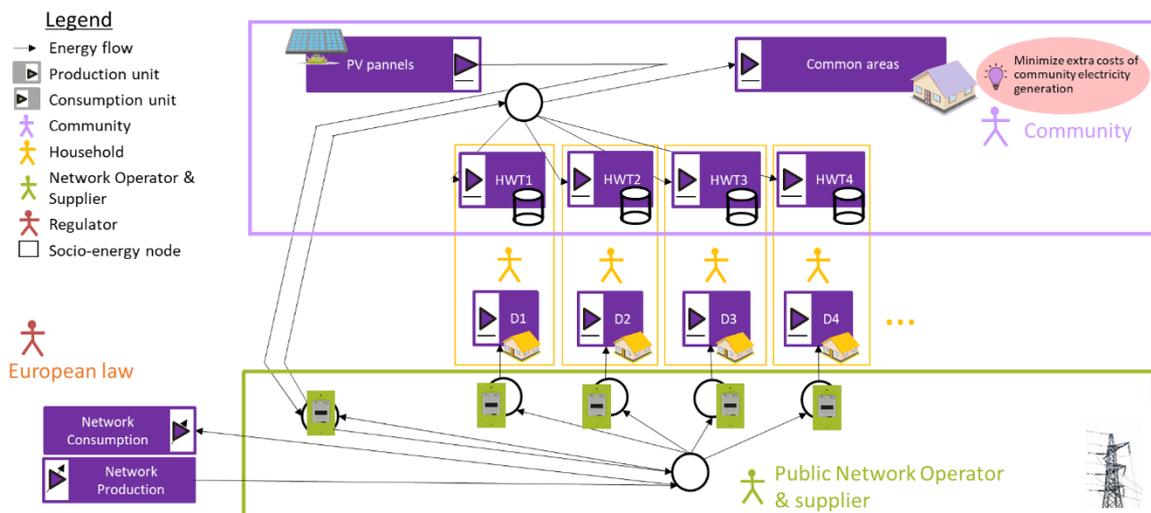


Figure 93 : Représentation graphique du SELBC, et des nœuds socio-énergétiques associés, porté par l'habitat participatif | Source : Auteure

b) Résultats de l'analyse qualitative pour le projet d'autoconsommation collective des Colibres

La requête réalisée pour le projet des Colibres à Forcalquier sur Nvivo permet d'extraire les contraintes et les objectifs par type d'acteurs, comme le montre la Figure 94.

	A : RI_CO_Contraintes non quantitatives ▼	B : RI_CO_Contraintes quantitatives ▼	C : RI_CO_Objectifs non quantitatifs ▼	D : RI_CO_Objectifs quantitatifs ▼	E : RI_Raisons-influentes-autres ▼
1 : Ac_Agrégateurs ▼	0	0	0	0	0
2 : Ac_Aménageurs ▼	0	0	0	0	0
3 : Ac_Architectes ▼	1	0	0	0	1
4 : Ac_Autorités-régulatrices-externes ▼	10	0	2	0	1
5 : Ac_Autorités-régulatrices-locales ▼	3	0	0	0	5
6 : Ac_Chargé_maintenance ▼	0	0	0	0	0
7 : Ac_Concepteurs-solutions ▼	1	0	1	3	0
8 : Ac_Consommateurs ▼	1	0	0	0	0
9 : Ac_Développeurs ▼	9	1	7	3	7
10 : Ac_Éléments-naturels ▼	0	0	0	0	0
11 : Ac_Financeurs ▼	1	0	1	1	0
12 : Ac_Fournisseurs ▼	4	0	1	0	0
13 : Ac_Gestionnaires-réseaux-chauffage ▼	0	0	0	0	0
14 : Ac_Gestionnaires-réseaux-élec-gaz ▼	4	0	0	1	4
15 : Ac_Installateurs ▼	0	0	0	0	0
16 : Ac_Prescripteurs ▼	0	0	0	0	2
17 : Ac_Producteurs-exploitants ▼	0	0	0	0	0
18 : Ac_Propriétaires ▼	7	1	5	2	9
19 : Ac_Prosumers ▼	9	1	8	8	6
20 : Ac_Riverains ▼	0	0	0	0	0
21 : Ac_Stockeurs ▼	0	0	0	0	0
22 : Ac_VRAC ▼	0	0	0	0	0

Figure 94 : Tableau de répartition des citations et verbatims portant sur les raisons influentes en fonction des types d'acteurs pour le cas d'étude de Forcalquier | Source : Auteure - extrait de Nivo

A l'instar du travail réalisé dans le chapitre V (cf. V.3), nous présentons dans cette partie les raisons influentes par type d'acteurs. Aucun acteur portant le rôle d'agrégateur, d'aménageur, de chargé de maintenance, de gestionnaire de réseau de chaleur et de gaz, ou encore d'installateur n'a été identifié pour ce projet. L'analyse de la thèse porte également sur le projet d'habitat participatif. Nous nous restreindrons dans notre analyse au projet du SELBC. Par ailleurs, les développeurs du projet ont porté de nombreuses casquettes : architecte, consommateurs, financeurs, propriétaires et prosumers. Comme indiqué dans la méthodologie, nous avons cherché à identifier les raisons influentes par rôle.

Architecte

L'architecte du projet de l'habitat participatif ne semble pas intervenir directement, en tant qu'architecte, sur la conception du projet énergétique. Également membre du projet participatif, ses raisons influentes seront étudiées en tant que consommateur, étant propriétaire d'un ménage, ou *prosumer*.

Autorités régulatrices extérieures au projet

D'après notre analyse, les autorités régulatrices extérieures intervenant dans le cadre du projet des Colibres sont **l'État français** et **l'Union Européenne**, via des **lois et décrets** sur la question de l'énergie. A ces acteurs régulateurs, s'ajoutent des acteurs « garants de la régulation » et ayant pour rôle de vérifier que les contraintes imposées par la régulation (les acteurs ou actants) sont appliqués. Il s'agit :

- **du Consuel**, dont le rôle est l'attestation de conformité des installations électriques, obligatoire dans les habitats neufs.
- **de l'électricien**, qui joue le rôle de conseiller pour la conception du système technique. En tant que prestataire, il cherche à satisfaire le client tout en respectant le cadre réglementaire. Donc dans le cadre du projet, il peut être considéré comme un garant de la régulation.

Contrainte portée non quantitatif : Interdiction d'une autoconsommation directe collective

L'autoconsommation directe entre plusieurs consommateurs sans passer par le réseau de distribution est interdit. Ainsi (Aubert 2020) explique : « Cette première configuration, en autoconsommation

directe, étant **interdite** avec les réglementations actuelles, les Colibres se sont orientés vers une autoconsommation collective sur-mesure »

Contrainte portée non quantitative : Interdiction d'un réseau fermé

Dans le même sens, la loi interdit les réseaux fermés pour le résidentiel comme l'explique le directeur innovation d'Enedis Aix-en-Provence « Elle [la loi] définit désormais très précisément trois cas distincts : « le réseau fermé qui ne s'adresse pas à du logement, la ligne directe 14 et le réseau de distribution public, incontournable » (Entretien avec le directeur innovation Enedis Aix-en-Provence, 29/05/18) (Aubert 2020).

Contrainte portée non quantitative : Obligation d'un fournisseur pour le projet d'autoconsommation collective

La réglementation oblige que le projet d'autoconsommation collective intègre un fournisseur. En effet, (Aubert 2020) déclare : « pour la phase d'autoconsommation collective "légale", les Colibres **doivent** trouver un fournisseur d'électricité qui accepte de les accompagner dans une démarche qui est nouvelle pour tous : la répartition des flux de l'opération d'[autoconsommation collective] ». Elle complète : « On observe ici qu'un premier actant non-humain, une loi européenne sur le marché de l'électricité, vient enclencher un premier changement technique dans l'assemblage préalablement constitué ».

Autorités régulatrices locales

C'est principalement la **Mairie** qui est citée comme acteur dans ce projet. Cependant, elle intervient dans ce projet, via le Plan local d'urbanisme, qui ne concerne pas la production d'énergie, mais peut tout de même porter des ambitions écologiques. Également propriétaire du réseau public d'électricité local, elle en délègue la gestion via une délégation de service public et ne s'exprime donc pas au moment de la conception du système technique.

Objectif non quantitatif : Ambition écologique

Les autorités locales peuvent porter leurs ambitions via des documents cadres tels que le Plan Local d'Urbanisme. Ainsi, (Aubert 2020) indique : « plusieurs années se sont écoulées avant que ce premier collectif ne trouve de lieu où le PLU convenait à leurs critères d'habitat groupé : habitat moderne accepté, ambitions écologiques valorisées » Le document cadre peut alors imposer des contraintes.

Concepteur solution

Le concepteur solution du projet est **l'électricien** qui n'a pas exposé de raisons influentes propres, mais qui a cherché à répondre aux objectifs des développeurs et aux contraintes imposées par les réglementations. Ainsi, il explique qu'il cherchait à « répondre aux envies du client tout en restant dans les normes » (Aubert 2020).

Consommateurs

Les consommateurs sont les **propriétaires ou locataires des 11 logements** du projet participatif. Leur nœud socio-énergétique est restreint aux appareils de consommation énergétique installés dans les logements. Nous n'avons pas identifié de contraintes propres au rôle de consommateur, mais plutôt associées au rôle de *prosumer* (voir section Prosumers).

Développeurs

De même, les développeurs du projet sont les *prosumers*, habitants des Colibres. Les contraintes et objectifs correspondent majoritairement au rôle de *prosumer* (voir section Prosumers).

Objectifs non quantitatifs : Mixité intergénérationnelle, prise de décision par consentement et empreinte écologique faible

Le collectif porte des objectifs qui vont au-delà du SELBC, mais dans lesquels le SELBC s'intègre. Ainsi, (Aubert 2020) identifie que « le projet concrétise plusieurs **principes** qui vont au-delà des considérations énergétiques : mixité intergénérationnelle, prise de décision par consentement, empreinte écologique faible sur plusieurs dimensions – eau, déchets, foncier, matériaux, paysage, consommation énergétique (blog des Colibres, consulté 06/19) ».

Objectif non quantitatif : Partager un habitat et un projet

De même, (Aubert 2020) indique qu'« au-delà du projet énergétique, un des objectifs premiers de l'habitat participatif des Colibres est de partager un habitat et un projet ».

Financeurs

Les Colibres sont également les financeurs de l'installation. Cependant, les décisions ne sont pas prises – principalement – par rapport à des questions financières. Ainsi, (Aubert 2020) explique que « leur objectif était de consommer localement et sobriement et non de gagner de l'argent avec leur installation ».

Objectif quantitatif : Eviter de payer un TURPE trop cher

Un objectif peut tout de même est identifié, mais (Aubert 2020) le positionne dans une situation d'incertitude pour les Colibres : il s'agit d'éviter de payer un TURPE trop cher. En effet, elle détaille : « les cadres juridique et économique concernant les taxes de réseau dans des opérations d'[autoconsommation collective] n'étaient pas encore clairs à l'époque de la mise en œuvre des installations électriques des Colibres. C'est pourquoi les Colibres ont cherché un moyen pour diminuer la part d'électricité passant par le réseau et augmenter la part autoconsommée directement. Pour éviter de payer un possible TURPE trop cher – « *on a senti que ça allait être moyen* » - les Colibres ont trouvé une solution pour optimiser leur autoconsommation : raccorder au bâtiment central collectif l'ensemble de leurs chauffe-eaux ».

Fournisseurs

Le fournisseur associé au projet d'autoconsommation collective des Colibres est le fournisseur Ilek. Le nœud socio-énergétique qu'il opère correspond aux flux d'énergies entre des centrales de production jusqu'au compteur des habitations. Il doit s'assurer de la bonne fourniture en tout temps, permettant la consommation de ces abonnés. On peut associer également la couche numérique de l'injection dans le réseau public jusqu'à la fourniture aux clients abonnés du réseau public pour le traitement des données, et inversement dans le cas de production locale d'énergie.

Objectif non quantitatif : Développer une offre commerciale d'autoconsommation collective

Le fournisseur Ilek accepte de participer au projet d'autoconsommation des Colibres. Une raison identifiée par (Aubert 2020) est l'intérêt d'expérimenter pour développer une offre commerciale. Elle écrit : « d'après un entretien avec le fournisseur, le projet des Colibres représentait leur premier cas d'autoconsommation collective, **pour** « *se faire la main* », et **pouvoir** ensuite développer une offre commerciale complète (Entretien avec le fournisseur d'électricité des Colibres, 03/05/18) »

Gestionnaire réseau d'électricité

Le gestionnaire du réseau public de distribution électrique est **Enedis**. Le nœud socio-énergétique qu'il opère est le réseau public de distribution d'électricité, jusqu'au compteur des habitations. Il doit s'assurer que le réseau peut assurer en tout temps la consommation des abonnés du réseau. On peut associer à cette couche énergétique, la couche numérique correspondante de l'injection dans le réseau public, jusqu'à la fourniture aux clients abonnés du réseau public pour la collecte des données.

Les contraintes indiquées comme portées par Enedis, telles que le besoin d'un point de livraison par consommateur, sont en fait portées par la loi, dont Enedis est un des garants (voir section Autorités régulatrices extérieures au projet)

Prescripteurs

Plusieurs prescripteurs peuvent être identifiés :

- **L'association proposant le label BDM.** S'agissant d'un label, aucune réglementation n'est imposée au projet. Ce sont donc les acteurs qui porteront le souhait de suivre ou non ce label.
- **L'association Hespul et les entreprises TECSOL et ENERPLAN** informant sur la TURPE, ils ne jouent que le rôle d'informateur.

Producteurs

Aucune raison influente n'a été identifiée pour le rôle de producteur uniquement, mais pour le rôle de *prosumer* (voir section Prosumers).

Propriétaires

Le rôle de propriétaire des installations est également assuré par les Colibres. Aucune raison influente propre au rôle de propriétaire des installations n'a été identifiée. En revanche, ces derniers sont cités en lien avec l'habitat participatif, l'installation des points de livraisons etc.

Prosumers

Les *prosumers* sont à la fois les **membres de l'habitat participatif** et à la fois la personne morale au sein de laquelle ils sont regroupés pour porter le projet. Aubert indique que le collectif prend des décisions communes « L'ensemble des éléments techniques concernant l'énergie (sens large – vecteurs électricité et chaleur, consommation et production) ont été décidés, choisis et parfois débattus ». (Blog des Colibres, consulté 07/19) dans (Aubert 2020). Le nœud socio-énergétique que le collectif opère est constitué à la fois de sources de consommation (les communs) et des sources de production (panneaux photovoltaïques dont il est prévu qu'ils soient installés en casquettes). **La personne morale** doit être légalement constituée dans le cadre d'un projet d'autoconsommation collective. Les objectifs identifiés ci-dessous deviennent parfois contraintes au cours du projet, amenant les Colibres à modifier l'assemblage pour y répondre.

Objectif quantitatif : L'autonomie énergétique

Un objectif global porté par les Colibres est l'autonomie énergétique. Ainsi, (Aubert 2020) indique : « Parmi ces ambitions, l'autonomie énergétique est un des objectifs principaux ». Elle complète : « la première étape vers l'autonomie énergétique consiste à concevoir un habitat très basse consommation. Ensuite, l'objectif est de produire l'énergie restante nécessaire au maximum sur place ».

Objectif quantitatif : Maximiser l'autoconsommation

Un second objectif essentiel pour le projet est de maximiser l'autoconsommation. En effet, Aubert indique : « les Colibres cherchaient une solution pour augmenter leur autoconsommation directe », « les Colibres ont trouvé une solution pour optimiser leur autoconsommation : raccorder au bâtiment central collectif l'ensemble de leurs chauffe-eaux ».

Objectif non quantitatif : Consommer localement

Les Colibres souhaitent également consommer localement : « leur objectif était de consommer localement et sobrement et non de gagner de l'argent avec leur installation ». (Aubert 2020). (Aubert 2020) complète : « Le choix des Colibres de consommer le plus possible l'électricité PV produite localement sans passer par le réseau public configure un assemblage d'acteurs spécifiques à ce projet ».

Objectif non quantitatif : Autoconsommation directe

Au-delà de consommer localement, ils souhaitent une autoconsommation directe : « les Colibres souhaitent, dès le début, une autoconsommation directe d'électricité renouvelable, au plus près du lieu de production ». (Aubert 2020)

Objectif non quantitatif : Consommer sobrement

Les Colibres souhaitent également consommer sobrement : « Leur objectif était de consommer localement et sobrement et non de gagner de l'argent avec leur installation ». (Aubert 2020)

c) Synthèse des contraintes et objectifs identifiés

	Objectifs	Contraintes
Architectes		
Autorités extérieures au projet		<ul style="list-style-type: none"> - Interdiction d'une autoconsommation directe collective - Interdiction d'un réseau fermé - Obligation d'un fournisseur pour le projet d'autoconsommation collective
Autorités locales	<ul style="list-style-type: none"> - Ambition écologique 	
Concepteurs solution		
Consommateurs		
Développeurs	<ul style="list-style-type: none"> - Mixité intergénérationnelle - Prise de décision par consentement - Empreinte écologique faible - Partager un habitat et un projet 	
Financeurs	<ul style="list-style-type: none"> - Eviter de payer un TURPE trop cher 	
Fournisseurs	<ul style="list-style-type: none"> - Développer une offre commerciale d'autoconsommation collective 	
Gestionnaires réseau électricité		
Prescripteurs		
Producteurs		
Propriétaires		
Prosumers	<ul style="list-style-type: none"> - L'autonomie énergétique - Maximiser l'autoconsommation - Consommer localement - Autoconsommation directe - Consommer sobrement 	

Tableau 18 : Synthèse des contraintes et objectifs identifiés pour le projet d'autoconsommation collective des Colibres | Source : Auteure

a) Présentation du terrain

Le projet consiste en la récupération de chaleur fatale d'une unité fortement consommatrice d'électricité située au Val d'Europe en Seine-et-Marne : un data center installé par une banque. Pour permettre la valorisation de la chaleur, Dalkia a développé un réseau de chaleur privé dont il est le gestionnaire. Deux autres acteurs principaux ont également été impliqués dans la définition du projet : le Syndicat d'Agglomération Nouvelle (SAN) qui deviendra la communauté d'agglomération SAN du Val d'Europe et l'aménageur EPAMarne-EPAFrance.

La chaleur fatale issue des data center est alors injectée sur le réseau de chaleur privé pour être distribuée aux consommateurs. Cherchant à limiter les interactions entre la banque et le gestionnaire de réseau, il a été décidé de dissocier la boucle de chaleur liée au data center de celle apportant la chaleur à la piscine (cf. Figure 95).

Aujourd'hui, le projet est en fonctionnement avec des possibilités de s'étendre sur le territoire. Deux problèmes majeurs ont été rencontrés. Le premier est que la banque produit finalement moins d'énergie qu'envisagé. Le second est que le réseau dessert moins de consommateurs que prévus, et ce pour deux raisons : le quartier se développe plus lentement, limitant le nombre de clients potentiels, et le réseau étant en basse tension, cela nécessite des surcoûts pour les acteurs.

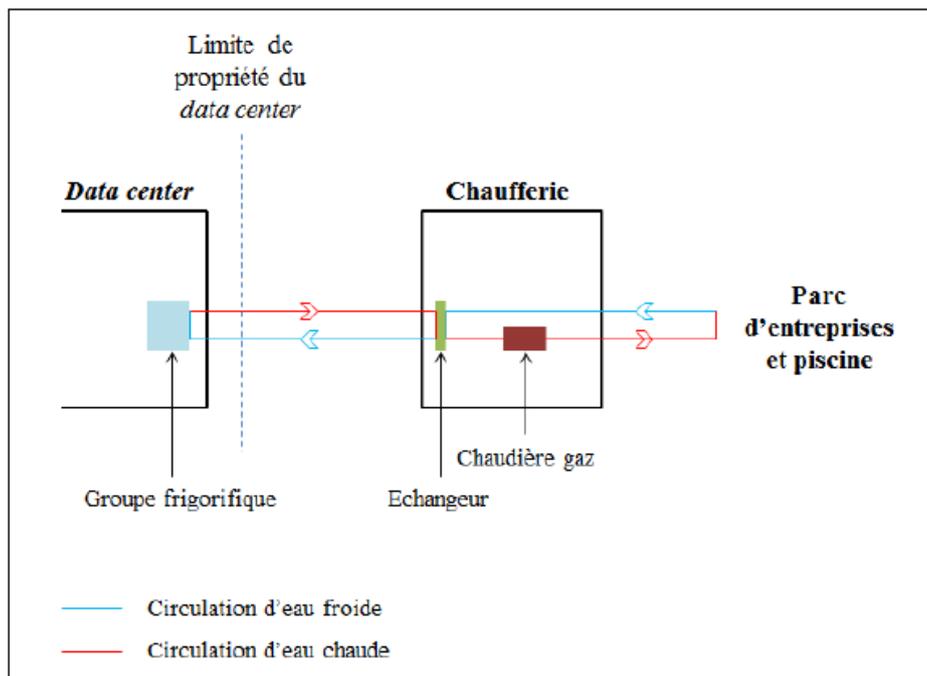


Figure 95 : Représentation graphique du projet de récupération de chaleur issue du data center | Source : (Hampikian 2017)

b) Résultats de l'analyse qualitative pour le projet de valorisation de chaleur au Val d'Europe

La requête réalisée pour le projet de valorisation de chaleur du Val d'Europe sur Nvivo permet d'extraire les contraintes et les objectifs par type d'acteurs comme le montre la Figure 96.

	A : RI_CO_Contraintes non quantitatives ▼	B : RI_CO_Contraintes quantitatives ▼	C : RI_CO_Objectifs non quantitatifs ▼	D : RI_CO_Objectifs quantitatifs ▼	E : RI_Raisons-influentes-autres ▼
1 : Ac_Agrégateurs ▼	0	0	0	0	0
2 : Ac_Aménageurs ▼	10	0	9	0	13
3 : Ac_Architectes ▼	0	0	0	0	0
4 : Ac_Autorités-régulatrices-extérieures... ▼	1	4	1	0	0
5 : Ac_Autorités-régulatrices-locales ▼	14	1	12	0	21
6 : Ac_Chargé_maintenance ▼	0	1	0	0	0
7 : Ac_Concepteurs-solutions ▼	0	1	0	1	1
8 : Ac_Consommateurs ▼	8	5	2	0	21
9 : Ac_Développeurs ▼	14	0	11	0	26
10 : Ac_Financeurs ▼	1	0	1	0	1
11 : Ac_Fournisseurs ▼	0	0	0	0	0
12 : Ac_Gestionnaires-réseaux-chaleur ▼	13	12	10	2	31
13 : Ac_Gestionnaires-réseaux-elec-gaz ▼	0	1	0	0	2
14 : Ac_Installateurs ▼	0	0	0	0	0
15 : Ac_Éléments-naturels ▼	0	0	0	0	0
16 : Ac_Prescripteurs ▼	0	0	0	0	0
17 : Ac_Producteurs-exploitants ▼	9	13	11	0	25
18 : Ac_Propriétaires ▼	0	0	0	0	0
19 : Ac_Prosumers ▼	0	0	0	0	0
20 : Ac_Riverains ▼	1	0	0	0	2
21 : Ac_Stockeurs ▼	0	0	0	0	0
22 : Ac_VRAC ▼	6	1	13	1	14

Figure 96 : Tableau de répartition des citations et verbatims portant sur les raisons influentes en fonction des types d'acteurs pour le cas d'étude de Val d'Europe | Source : Auteure - extrait de Nivo

A l'instar du travail réalisé dans le chapitre V (cf. V.3), nous présentons dans cette partie les raisons influentes par type d'acteurs. Aucun acteur portant le rôle d'agrégateur, d'architecte, de fournisseur, de gestionnaire de réseau de gaz, d'installateur, de prescripteur, de *prosumer*, ou encore de stockeur, n'a été identifié pour ce projet.

Aménageur

L'aménageur du site sur lequel est développé le projet de valorisation est l'Établissement Public d'Aménagement (EPA) EPAMarne-EPAFrance.

Objectif quantitatif : Faire bénéficier les acquéreurs de tarifs intéressants pour la fourniture d'énergie

Un premier objectif identifié de l'aménageur est de pouvoir trouver des acquéreurs pour le territoire qu'il est chargé d'aménager. Dans ce cadre, un objectif identifié ici consiste à « tenir les prix », et donc à proposer des tarifs intéressants pour la fourniture d'énergie. (Hampikian 2017) indique en effet que « des réflexions sont donc en cours du côté de l'aménageur pour penser les moyens d'interconnecter les productions géothermiques et fatales afin d'obtenir une concurrence entre les sources qui permette de tenir les prix ».

Objectif quantitatif : Développer la biomasse

Un autre objectif mis en évidence par (Hampikian 2017) est le souhait de développer de la biomasse sur le territoire. Ainsi, elle indique : « la biomasse y est privilégiée, conformément à une stratégie énergétique portée par l'aménageur ».

Objectif non quantitatif : Conserver de bonnes relations avec les autres acteurs du territoire

Un des objectifs portés par l'aménageur consiste à vouloir garder de bonnes relations avec les autres acteurs du territoire. Ainsi, (Hampikian 2017) explique : « Nous, on y est allé un peu à reculons, on était un peu contraint, imposé, parce **qu'on ne veut pas non plus** se fâcher avec le SAN [Syndicat

d'Agglomération Nouvelle], **on ne veut pas non plus** se fâcher avec Disney parce que c'est quand même notre premier client ».

Objectif non quantitatif : Proposer une image attractive du territoire

Un des intérêts de l'aménageur est de proposer une image attractive du territoire afin de trouver des acquéreurs. Ainsi, (Hampikian 2017) écrit : « Pour justifier ce revirement d'opinion, l'aménageur se réfère à une argumentation qui n'a pas de lien direct avec la synergie en elle-même, mais avec une **stratégie** locale plus large des acteurs publics, qui consiste à présenter Marne-la-Vallée comme le « territoire du développement durable ».

Contrainte non quantitative : Interdiction possible d'un projet y ayant recours

Lorsqu'un aménageur est présent sur un territoire, il est responsable de l'aménagement pour une zone définie. Il devient donc par ce biais responsable des sols de cette zone. Hampikian explique ainsi qu'« alors que la solution d'un réseau privé est actée par Dalkia et le SAN, il est **nécessaire** de la confronter à l'aménageur, puisque les tuyaux du réseau sont amenés à passer sous de futurs espaces publics : « les sols appartiennent à l'EPA, jusqu'à ce qu'ils soient rétrocédés à la collectivité » (Entretien avec le responsable de l'énergie à la direction Développement Durable de l'EPAMarne, 15/09/2014) ». Ainsi, au début du projet, la direction de l'EPA « s'oppos[e] à un engagement à moins qu'une DSP [Délégation de Service Public] ne soit mise en œuvre » (Hampikian 2017).

Contrainte portée/subie non quantitative : Obliger le raccordement au réseau de chauffage

L'EPA pourrait imposer, au nom de l'établissement public chargé de la compétence de délégation de service public, le raccordement au réseau de chauffage urbain. Dans le cas d'un réseau privé, comme c'est le cas pour le projet du Val d'Europe, ils refusent cependant de le faire. Ainsi, le responsable de l'énergie à la direction Développement Durable de l'EPAMarne explique : « *Si l'opérateur privé se casse la gueule, on se retrouve derrière avec des lots **qu'on a obligé** à raccorder à un opérateur qui met la clé sous la porte. [...] On pourrait dire à l'établissement public, vous nous avez obligés à nous raccorder, maintenant qu'est-ce qu'on fait ? Et donc ça revient tout dans la figure* ». (Entretien avec le responsable de l'énergie à la direction Développement Durable de l'EPAMarne, 15/09/2014) (Hampikian 2017).

Raison influente autre : Un acteur limitant car non associé à la réflexion du projet

Le fait de ne pas associer un acteur dans le processus de réflexion du projet peut l'amener à refuser le projet pour cette raison. Ainsi, (Hampikian 2017) explique : « Le projet ainsi présenté à l'EPA lui plaît peu, en premier lieu parce que le service développement durable de l'établissement accepte mal le fait de n'avoir pas été associé aux réflexions qui entrent de son point de vue pleinement dans ses compétences ».

Autorités régulatrices extérieures au projet

Les autorités régulatrices extérieures au projet, identifiées dans le cadre du projet du Val d'Europe, sont des réglementations et des taxes.

Contrainte portée quantitative : Minimum de température de fourniture de la chaleur

La réglementation impose une température minimale de fourniture de chaleur aux consommateurs. C'est donc sur cette température que s'est basé le dimensionnement des installations pour la récupération de la chaleur du data center. (Hampikian 2017) explique : « Le choix de cette température précise n'est pas anodin, puisqu'il correspond à une **réglementation** touchant la fourniture d'eau chaude sanitaire : « *l'exploitant a une obligation de fournir au minimum 55°C, puisque c'est un problème sanitaire : c'est un problème de légionellose* » (Entretien avec un ingénieur de la direction technique et grands projets Dalkia 24/10/2014) ».

Contrainte portée quantitative : les taxes

Les taxes récupérées par les communes peuvent jouer un rôle important dans le développement des projets. C'est ce que montre un extrait d'un entretien avec la directrice du développement économique du Syndicat d'Agglomération Nouvelle (SAN) sur Val d'Europe : « *La taxe professionnelle, dedans, ce sont les immobilisations qui sont taxées. Donc pour les data centers, c'est colossal. Les immobilisations, c'est tous les serveurs, donc ça nous rapportait énormément en termes de fiscalité. Manque de bol, juste quand ils sont arrivés, juste après, il y a eu le changement avec la CET, la contribution économique territoriale, qui est séparée entre la contribution économique foncière et la contribution sur la CVAE, la taxe sur la valeur ajoutée. Et là, ça a complètement changé la donne, puisque ce n'est pas du tout appliqué sur les immobilisations. C'est sur la valeur locative, ce qui veut dire que maintenant un data center, ça rapporte que dalle en fiscalité. Pas grand-chose. Et il y a très peu d'emploi, et ça mange du foncier. Donc on a dit OK, ça on le voulait on l'a eu [...] [Après l'installation de plusieurs data centers], on s'est dit là stop, on arrête. Ça nous mange plein de parcelles, on arrête de vendre du foncier pour avoir dix emplois et que ça ne nous rapporte pas énormément* ». (Entretien avec la directrice du développement économique du SAN du Val d'Europe, 03/10/2014) (Hampikian 2017).

Autorités régulatrices locales

L'autorité régulatrice locale principale est le Syndicat d'Agglomération Nouvelle (SAN). Il porte également le rôle de développeur. Il nous a donc fallu différencier les contraintes et objectifs portés dans le cadre du rôle d'autorité régulatrice locale et dans le cadre du rôle de développeur. Les communes sont également considérées comme autorités régulatrices locales.

Objectif non quantitatif : Objectifs de développement durable

L'autorité locale porte des objectifs de développement durable. En effet, (Hampikian 2017) écrit : « On peut ainsi lire la formulation suivante dans un document de projet présenté aux différents partis en 2009 : « afin de poursuivre une démarche environnementale et pour satisfaire des **prescriptions** de Développement Durable établies par l'autorité politique et administrative locale en association avec les décideurs locaux, Dalkia France, en collaboration avec le développeur/aménageur, prévoit l'installation d'un réseau privé d'énergie pour alimenter la Zone d'aménagement du Prieuré situé à Val d'Europe et jusque dans ses limites de production et de distribution » Document de travail Dalkia

« Projet de réseau de chaleur privé avec une valorisation d'énergie fatale » - Juillet 2009 » (Hampikian 2017).

Objectif non quantitatif : Maitriser la stratégie énergétique du territoire

Un responsable de projet chez Cofely identifie pour le syndicat et les communes le souhait de maitriser la stratégie énergétique du territoire. En effet, il explique : « *le réseau il est ... quelque part, même s'il est subventionné ce n'est pas un réseau qui dépend de l'autorité publique. Or, on peut se dire quand même que le SAN et les communes **souhaiteraient** maîtriser la stratégie énergétique et être aux manettes* ». (Entretien avec un responsable de projet, Cofely, 02/09/2015) (Hampikian 2017).

Contrainte portée non quantitative : Les communes possèdent la compétence de la DSP

L'échelle du projet rentre en conflit avec la compétence de la délégation de service publique (DSP) qui est portée par les communes. En effet, le projet se porte à l'échelle du Parc International d'Entreprises (PIE) qui recoupe plusieurs communes. Il est possible de transférer des compétences, mais le processus peut être long. Ainsi, (Hampikian 2017) explique : « La solution de la délégation de service public ayant été abandonnée pour des raisons de délais lorsque l'idée était restreinte à la piscine l'est d'autant plus dès le moment où un réseau sur tout le PIE est envisagé. En effet, ce dernier se trouvant à cheval sur deux communes, il n'existe pas de périmètre préétabli pour mettre en œuvre une DSP puisque ce sont les communes, et non le SAN, qui en possèdent la compétence ». Le directeur des services techniques du SAN du Val d'Europe précise : « *C'est pour ça qu'on est avec un réseau privé, parce qu'il y avait une question de délai. Nous, une DSP il faut deux ans pour la mettre. Il faut faire une consultation, il faut faire ceci, cela* ». (Entretien avec le directeur des services techniques du SAN du Val d'Europe 24/09/2014)

Contrainte portée non quantitative : Obliger le raccordement au réseau de chauffage

La mise en place d'une délégation de service public (DSP) permet d'obliger un raccordement obligatoire des consommateurs. Le chef de projets EPAMarne-EPAFrance explique : « *Alors c'est vrai que c'est mieux d'avoir une DSP, parce que ça permet **d'obliger** en plus derrière tout le monde à se raccorder etc* ». (Entretien avec un chef de projets, EPAMarne-EPAFrance 23/01/2015) (Hampikian 2017).

Contrainte portée quantitative : Raccorder les équipements publics au réseau

Dans le projet du Val d'Europe, le syndicat décide de raccorder les équipements publics au réseau. Ainsi Hampikian explique : « le SAN s'engage également à connecter les équipements publics de la zone au réseau » (Hampikian 2017).

Chargé de maintenance

Le rôle de chargé de maintenance est assuré par Dalkia, qui est aussi le gestionnaire du réseau de chaleur.

Contrainte portée quantitative : Arrêt de l’approvisionnement de chaud pour maintenance

Le chargé de maintenance impose la contrainte d’arrêter l’approvisionnement de chaud pour pouvoir réaliser la maintenance du réseau. Ainsi, Hampikian explique : « En été, lorsque l’usage du chauffage est inutile, le réseau subit une maintenance et est donc hors service pendant quelques jours. Pour les hôtels, un arrêt de la production de chaleur, qui entraînerait un arrêt de la production d’eau chaude sanitaire, n’est pas envisageable : *« c’est que l’entretien du réseau grosso modo, il y a une ou deux journées où dans l’année le réseau doit passer un entretien. Alors pour le chauffage ce n’est pas gênant, mais pour l’eau chaude sanitaire, ça ne le fait pas »*. (Entretien avec la directrice du développement économique du SAN du Val d’Europe, 03/10/2014) » (Hampikian 2017).

Concepteur solution

Dalkia porte le rôle de concepteur solution et de gestionnaire du réseau de chaleur. A l’instar des concepteurs solutions, Dalkia ne porte pas d’objectifs ou de contraintes propres dans ce rôle. On peut tout de même noter la forme du projet proposée afin de limiter les interactions entre la banque et le gestionnaire de réseau. En effet, la solution trouvée consiste à dissocier la boucle de chaleur liée au data center de celle apportant la chaleur à la piscine (cf. Figure 95). Un ingénieur de la direction technique et grands projets de Dalkia explique : *« On aurait pu imaginer directement [une seule boucle], sauf que comme on pouvait être amenés ... on peut imaginer que ce réseau-là soit coupé, et on devait fonctionner quand même [...] et puis nous on est amené éventuellement à le réchauffer par la chaudière. Donc du coup on leur aurait renvoyé du chaud plutôt que du froid, voilà... »* (Entretien avec un ingénieur de la direction technique et grands projets Dalkia 24/10/2014) (Hampikian 2017).

Consommateurs

Ce projet faisant parti d’un projet d’aménagement plus large, l’ensemble des consommateurs ne sont pas identifiés au début du projet et arrivent petit à petit pour s’installer sur le territoire. Le réseau de chaleur ne répond pas à l’ensemble des besoins portés par les nouveaux acquéreurs, ils ne choisissent donc pas cette option. C’est pourquoi les besoins des consommateurs sont mis en exergue dans ce projet.

Contrainte portée quantitative : Contrainte d’accès au froid

Un premier besoin identifié est l’accès au froid. (Hampikian 2017) explique : « Tout d’abord, la question de la production de froid, qui peut paraître anecdotique, se pose dans les faits comme un **point bloquant** pour plusieurs entreprises, en particulier pour les promoteurs de locaux tertiaires : *« vous me direz, on est en Seine-et-Marne, sur le plateau de la Brie, les utilisateurs n’ont pas besoin de froid. Par contre un investisseur, ou même un utilisateur, quoi qu’il arrive, le B-A BA dans un bâtiment, ce qu’on a là, c’est une cassette double-flux chaud et froid. [...] si j’étais promoteur, on est sur un marché immobilier un peu tendu en termes de commercialisation, donc effectivement, retirer une prestation **nécessaire** aux utilisateurs qui est le froid, c’est dommageable pour un promoteur »* (Entretien avec un ancien chargé de développement immobilier chez Disney, 03/11/2014).

Contrainte portée quantitative : Contrainte d'une consommation d'énergie continue

Une autre contrainte est un besoin d'accès continue à l'énergie pour l'eau chaude sanitaire. Ainsi, (Hampikian 2017) explique : « Ensuite, une deuxième problématique se pose pour le cas des bâtiments destinés à l'hôtellerie prévus sur le PIE : celle de l'interruption de la livraison de chaleur. En été, lorsque l'usage du chauffage est inutile, le réseau subit une maintenance et est donc hors service pendant quelques jours. Pour les hôtels, un arrêt de la production de chaleur, qui entraînerait un arrêt de la production d'eau chaude sanitaire, n'est pas envisageable : *« c'est que l'entretien du réseau grosso modo, il y a une ou deux journées où dans l'année le réseau doit passer un entretien. Alors pour le chauffage ce n'est pas gênant, mais pour l'eau chaude sanitaire, ça ne le fait pas. Alors quand on est dans un hôtel, encore moins, c'est impossible. Donc il fallait qu'ils aient ici pour l'hôtel une offre plus globale, chaud-froid et assurer la continuité 365 jours. Et ça, ils ont mis beaucoup, beaucoup de temps à sortir une offre complète et globale. Qui s'appuie bien évidemment sur le chauffage urbain mais qui rende les services attendus. Ça paraît comme ça du détail, mais c'est leur besoin à cet hôtel, il faut répondre à l'ensemble de leur besoin »* (Entretien avec la directrice du développement économique du SAN du Val d'Europe, 03/10/2014) ».

Développeur

Le développeur du projet est le Syndicat d'Agglomération Nouvelle (SAN). Un autre « développeur » est identifié dans le projet, il s'agit de Disney. En effet, Disney accompagne le développement urbain sur le territoire, mais il ne développe par le SELBC que nous étudions. Nous ne le considérons donc pas comme portant le rôle de développeur du SELBC.

Objectif non quantitatif : Développer des projets vertueux

Le Syndicat d'Agglomération Nouvelle indique au départ vouloir porter un projet vertueux : *« On était parti à l'époque sur une chaufferie bois sur la piscine, parce qu'on voulait quelque chose de vertueux »* (Entretien avec le directeur des services techniques du SAN du Val d'Europe 24/09/2014) (Hampikian 2017).

Objectif non quantitatif : Maitriser la stratégie énergétique du territoire

Un responsable de projet chez Cofely identifie pour le syndicat et les communes le souhait de maitriser la stratégie énergétique du territoire. En effet, il explique : *« le réseau il est ... quelque part, même s'il est subventionné ce n'est pas un réseau qui dépend de l'autorité publique. Or, on peut se dire quand même que le SAN et les communes souhaiteraient maîtriser la stratégie énergétique et être aux manettes »* (Entretien avec un responsable de projet, Cofely, 02/09/2015) (Hampikian 2017).

Contrainte portée quantitative : Raccorder les équipements publics au réseau

Dans le projet du Val d'Europe, le syndicat décide de raccorder les équipements publics au réseau. Ainsi (Hampikian 2017) explique : *« le SAN s'engage également à connecter les équipements publics de la zone au réseau »*.

Raison influente autre : Identifier du potentiel sur le territoire

Dans ce cas, le développeur est la banque possédant un data center. Cette raison influente montre l'enjeu local des SELBC, qui ne peuvent pas être développés n'importe où. Ainsi, un responsable des travaux de la banque explique : « *on a fait la même démarche [pour notre second data center], on a cherché à trouver un partenaire local, mais il n'y avait rien autour, il n'y avait pas de piscine, il n'y avait rien, donc là on est parti sur un autre système complètement différent, qui est le free cooling* » (Entretien avec le responsable des travaux de la banque, 10/12/2014) (Hampikian 2017).

Financeurs

Le financeur du réseau de chaleur au Val d'Europe est Dalkia. Il en est le seul investisseur car le réseau n'appartient pas à la collectivité : il s'agit d'un réseau privé. Un autre financeur identifié dans la monographie est le conseil régional d'Ile de France dans le cadre du projet de géothermie avec Cofely, autre projet de valorisation des ressources locales développé sur le territoire.

Objectif non quantitatif : Intérêt pour la géothermie

En tant que financeur, le Conseil Régional d'Ile de France choisit de financer des projets de géothermie. En effet, (Hampikian 2017) explique : « Les objectifs pour la géothermie sont perçus sous un jour favorable par le conseil régional d'Ile de France, qui en plus d'avoir subventionné les investissements, s'engage, dans une convention signée avec Cofely, « à **soutenir** le projet de géothermie de Villages Nature comme première étape d'une expérimentation à grande échelle qui participera au renforcement des énergies renouvelables dans le mix énergétique, et à accompagner le déploiement du réseau géothermique dans les futurs projets urbains du Val d'Europe portés par l'EPAFrance » (Entretien avec un chef de projets, EPAMarne-EPAFrance 23/01/2015) ».

Gestionnaire réseau de chaleur

Dalkia est le gestionnaire du réseau de chaleur. Il en est également le propriétaire, ce réseau étant un réseau privé.

Objectif quantitatif : Maximiser la récupération

Sur le système de récupération de chaleur du data center, Dalkia vise à maximiser la récupération de chaleur fatale. Ainsi un technicien d'exploitation chez Dalkia explique : « *on utilise au **maximum** les calories. [...] Donc on a les vannes de régulation derrière, qui varient avec la température extérieure. Avec ça, et grâce au variateur, on augmente et on diminue les débits pour consommer au maximum la puissance. On **essaye** d'utiliser au maximum la température* » (Entretien avec un technicien d'exploitation, Dalkia, 24/10/2014) (Hampikian 2017).

Objectif quantitatif : Prioriser l'utilisation de la chaleur produite

En plus de maximiser la récupération de chaleur fatale, le système a été construit de telle sorte par Dalkia que la chaleur collectée soit utilisée en priorité. Ainsi, (Hampikian 2017) explique : « En outre,

le système technique est construit pour que les calories provenant du data center soient toujours utilisées prioritairement aux systèmes d'appoint ».

Objectif non quantitatif : Récupérer une chaleur sans nouveau système de production

Dalkia exprime plusieurs intérêts vis-à-vis du projet de récupération de chaleur fatale. Un premier est de pouvoir récupérer de la chaleur sans avoir besoin d'installer de nouveau système de production de chaleur. En effet, (Hampikian 2017) indique : « Dalkia **y voit la possibilité** de tirer parti d'une ressource disponible sans besoin d'installer des dispositifs de production et de mettre en œuvre une expérimentation innovante ».

Objectif non quantitatif : Mettre en œuvre une expérimentation

Un second intérêt est de pouvoir mettre en œuvre une expérimentation. En effet, (Hampikian 2017) indique : « Dalkia **y voit la possibilité** de tirer parti d'une ressource disponible sans besoin d'installer des dispositifs de production et de mettre en œuvre une expérimentation innovante ».

Objectif non quantitatif : Développer des offres de récupération d'énergie

Un troisième intérêt est d'acquérir de l'expérience pour pouvoir développer des offres de récupération d'énergie. Ainsi, (Hampikian 2017) écrit : « En outre, elle entre en concordance avec une **stratégie** plus large de l'entreprise visant au développement des offres basées sur la récupération d'énergie ». Cet objectif peut être directement relié à l'objectif précédent sur la mise en œuvre d'une expérimentation.

Objectif non quantitatif : Développer de nouvelles relations avec les industriels

Un quatrième intérêt est de pouvoir développer de nouvelles relations avec les industriels. En effet, la directrice du marketing précise : « *Ça nous **intéresse** aussi parce qu'on n'est pas un acteur majeur des activités industrielles et c'est une façon d'entrer chez l'industriel. [...] Ça nous permet de nous placer en plus sur un point totalement différent quand on va voir l'industriel, parce qu'au lieu de lui dire « bonjour, je viens vous vendre quelque chose », on vient lui dire « bonjour, je viens vous acheter quelque chose » » (Entretien avec la directrice du marketing, Dalkia Ile de France, 05/06/2015) (Hampikian 2017).*

Contrainte portée quantitative : Proposer un prix unique aux consommateurs

Dalkia décide de ne proposer qu'un prix unique localement aux consommateurs pour la chaleur, ce qui l'amène à abandonner un autre projet de valorisation de chaleur. (Hampikian 2017) précise : « L'aménageur regrette cette décision qu'il attribue en partie au choix de Dalkia d'avoir souhaité conserver un prix de la chaleur identique à celui proposé sur le PIE : « *ils **ont voulu absolument** vendre le même prix du kW qu'ici, alors qu'en fait pour cette opération, très raisonnablement, les travaux coûtaient deux fois moins cher. Là, ici, il y en a eu pour 4 millions d'euros de travaux, de tuyaux etc., et là on était à moins de deux. Donc ils auraient dû réadapter leur prix de sortie, leur prix de vente. Et là le choix de leur direction a été de dire : non, on fait le même tarif pour tout le monde. [...] Parce que, ils auraient réussi à avoir cette opération-là, [...] ça leur permettait de justifier l'investissement pour amener la desserte ici et tout le reste c'était du bonus » (Entretien avec un chef de projets, EPAMarneEPAFrance 23/01/2015) ». Nous considérons cette raison influente comme une contrainte,*

bien qu'elle pourrait être considérée comme un objectif, car lorsque l'objectif n'est pas atteint, le projet est abandonné, à l'instar de l'influence des contraintes.

Producteurs

Le producteur de la chaleur fatale dans le cadre du projet du Val d'Europe est la banque pour son data center. D'autres banques sont également envisagées par le développeur.

Objectif non quantitatif : Être vertueux en matière d'environnement

Une raison qui a amené la banque à participer au projet est l'intérêt d'être vertueuse. Ainsi le responsable des travaux de la banque explique : « *On ne peut pas être banque de financement de ce type d'énergies sans avoir une volonté interne d'être un peu vertueux en matière d'environnement. Donc on a une politique interne qui nous incite à faire ça* ». (Entretien avec le responsable des travaux de la banque, 10/12/2014) (Hampikian 2017).

Objectif non quantitatif : Porter une démarche environnementale volontariste

Une seconde raison, qui rejoint la première raison, est le souhait de porter une démarche environnementale volontariste. En effet, (Hampikian 2017) précise : « La banque, quant à elle, y perçoit la possibilité de mettre en œuvre une démarche environnementale volontariste qu'elle cherche à appliquer à l'ensemble des travaux qu'elle entreprend. Cette dernière passe en particulier par une stratégie de certification environnementale appliquée à l'ensemble des bâtiments qu'elle construit pour ses différentes activités ».

Contrainte portée quantitative : Fournir une quantité minimale d'énergie

Une contrainte, acceptée et donc portée par la banque, est d'assurer la fourniture d'une quantité minimale d'énergie dans des conditions données. Ainsi, (Hampikian 2017) précise : « En conditions « normales », le data center **doit être capable** de livrer 180 m³ d'eau par heure à une température de 55°C ». (Hampikian 2017) présente dans sa thèse des difficultés pour cet acteur à respecter cette contrainte.

Contrainte portée quantitative : Ne pas avoir de surcoûts

La banque impose la contrainte de ne pas avoir de surcoûts liés à la valorisation de chaleur. Ainsi, le directeur des services techniques du SAN cite la banque : « *Par exemple, il nous on dit, nous, de toute façon, votre projet, ce n'est qu'un projet, nous on n'a pas étudié cette question-là, nous on est parti sur des tours aéro-réfrigérantes [...] nous, le moindre surcoût on ne peut pas l'absorber [...]* » (Entretien avec le directeur des services techniques du SAN du Val d'Europe 24/09/2014) (Hampikian 2017).

c) Synthèse des contraintes et objectifs identifiés

	Objectifs	Contraintes
Aménageurs	<ul style="list-style-type: none"> - Faire bénéficier les acquéreurs de tarifs intéressants pour la fourniture d'énergie - Développer la biomasse - Conserver de bonnes relations avec les autres acteurs du territoire - Proposer une image attractive du territoire 	<ul style="list-style-type: none"> - Interdiction possible d'un projet y ayant recours - Obliger le raccordement au réseau de chauffage
Autorités extérieures au projet		<ul style="list-style-type: none"> - Minimum de température de fourniture de la chaleur - les taxes
Autorités locales	<ul style="list-style-type: none"> - Objectifs de développement durable - Maitriser la stratégie énergétique du territoire 	<ul style="list-style-type: none"> - Les communes possèdent la compétence de la DSP - Obliger le raccordement au réseau de chauffage - Raccorder les équipements publics au réseau
Chargés de maintenance		<ul style="list-style-type: none"> - Arrêt de l'approvisionnement de chaud pour maintenance
Concepteurs solution		
Consommateurs		<ul style="list-style-type: none"> - Contrainte d'accès au froid - Contrainte d'une consommation d'énergie continue
Développeurs	<ul style="list-style-type: none"> - Développer des projets vertueux - Maitriser la stratégie énergétique du territoire 	<ul style="list-style-type: none"> - Raccorder les équipements publics au réseau
Financeurs	<ul style="list-style-type: none"> - Intérêt pour la géothermie 	
Gestionnaires réseau électricité	<ul style="list-style-type: none"> - Maximiser la récupération - Prioriser l'utilisation de la chaleur produite - Récupérer une chaleur sans nouveau système de production - Mettre en œuvre une expérimentation - Développer des offres de récupération d'énergie - Développer de nouvelles relations avec les industriels 	<ul style="list-style-type: none"> - Proposer un prix unique aux consommateurs
Producteurs	<ul style="list-style-type: none"> - Être vertueux en matière d'environnement - Porter une démarche environnementale volontariste 	<ul style="list-style-type: none"> - Fournir une quantité minimale d'énergie - Ne pas avoir de surcoûts

Tableau 19 : Synthèse des contraintes et objectifs identifiés pour le projet de valorisation de chaleur fatale du Val d'Europe |
Source : Auteure

Annexe H Exemple de consentement éclairé pour la récupération de matériaux (données énergétiques, entretiens, photos...) en accord avec la RGPD

Cette annexe présente une notice d'information et de consentement éclairé pour la récupération de matériaux de type données énergétiques, entretiens, photos, etc. en accord avec la RGPD. Le document a notamment été établi au sein du projet de recherche en accompagnement avec Ariane, le groupe d'appui méthodologique en sciences sociales du laboratoire Pacte¹¹⁹, et le délégué local à la protection des données. Ce travail nous a permis de collecter, en respect avec le droit français¹²⁰ et européen, des données énergétiques, ainsi que de travailler sur des entretiens. Sont indiquées en vert les parties spécifiques à notre contexte de recherche.

Notice d'information et consentement éclairé

Titre du projet : Eco-SESA

Responsable : Gilles Debizet/Frédéric Wurtz

Objectif du projet : produire des connaissances, concepts, outils et méthodes répondant aux enjeux liés à l'intégration des énergies renouvelables produites localement dans les zones urbaines.

Nous vous demandons de prendre le temps de lire et de comprendre les informations suivantes avant de donner votre accord en signant le formulaire de consentement.

Ce qui est attendu de votre participation et objectifs de la démarche

Votre contribution consistera au partage de vos données liées à votre projet de partage d'énergies, de photos et de schémas, à la participation à des entretiens et à accepter la présence d'un chercheur pendant des réunions à propos du projet Eco-SESA, ainsi qu'à permettre leurs enregistrements.

Les données concernant le projet d'autoconsommation collective seront les suivantes :

- pour les unités de consommation : un moyen d'identification de l'unité, les caractéristiques de l'unité, des informations sur les systèmes de consommation et données de consommation,
- pour les unités de production : des informations sur les systèmes de production d'énergie in-situ et données des productions.

¹¹⁹ Pacte, page « Méthodologie », *Pacte Grenoble*, consultée en février 2020, <https://www.pacte-grenoble.fr/page/methodologie>.

¹²⁰ Loi n° 2018-493 du 20 juin 2018 relative à la protection des données personnelles (1).

Ces données feront l'objet d'un recueil et d'un traitement informatique dont les objectifs sont de modéliser et de questionner des projets de partage d'énergie en se basant sur des données de consommation et de production réelles.

Vos droits de vous retirer de la recherche en tout temps

Votre participation au projet **Eco-SESA** est entièrement libre et volontaire. Elle n'est possible que si vous donnez votre consentement explicite en signant ce formulaire. Une fois la démarche ou l'entretien commencé, vous êtes libre de vous en retirer ou de cesser votre participation à tout moment. Ce retrait n'aura aucune conséquence.

Vos droits à la confidentialité et au respect de la vie privée

Le projet **Eco-SESA** prend les engagements suivants :

- 1) Les données obtenues de votre part seront traitées avec la plus entière confidentialité.
- 2) Seules les données strictement nécessaires à la réalisation de notre recherche mentionnée ci-dessus, ainsi que les rapports, les photos et notes liées seront conservées et utilisées.
- 3) Votre identité sera dissimulée à l'aide d'un numéro aléatoire dans tous les écrits produits sur la base de vos propos et archivés.
- 4) Les données collectées, notes d'entretien, comptes rendus d'entretien, notes d'observation, notes d'analyses destinées à être diffusées, ainsi que les publications seront anonymisés. Dans le cas où il apparaîtrait pertinent de vous nommer ou de nommer votre quartier, le projet Eco-SESA s'engage à vous faire valider par écrit les données citées.
- 5) Toutes les données produites et archivées seront gardées en France dans un endroit sécurisé et seuls le responsable scientifique et les chercheurs adjoints y auront accès. Elles seront détruites au bout de 12 ans.
- 6) Votre formulaire de consentement sera conservé pendant 12 ans par le responsable du projet, puis sera détruit.
- 7) Vous aurez à tout moment pendant ces 12 ans la possibilité de demander la destruction ou la rectification des données issues de votre participation en en faisant la demande au responsable scientifique (Gilles Debizet/Frédéric Wurtz) : cdp.ecosesa@univ-grenoble-alpes.fr.
- 8) Le délégué à la protection des données du projet **Eco-SESA** est Patrick Guillot (Université Grenoble Alpes) : cil@grenet.fr.

Diffusion

Les résultats de cette recherche seront diffusés dans des productions scientifiques, ainsi que dans des médias ou événements destinés au grand public.

Vos droits de poser des questions en tout temps

Vous pouvez poser des questions au sujet de la recherche en tout temps en communiquant avec le responsable scientifique du projet par courrier électronique à l'adresse suivante : cdp.ecosesa@univ-grenoble-alpes.fr.

Consentement à la participation

Pour garantir vos droits à la vie privée, nous vous demandons de bien vouloir donner votre consentement explicite, par lequel vous certifiez que vous avez lu et compris les renseignements ci-dessus, qu'ils permettent de vous informer de façon satisfaisante, que les questions éventuelles que vous pouviez avoir à ce propos ont été répondues et que vous avez été avisé que vous étiez libre de retirer votre consentement sans préjudice :

- Je déclare avoir pris connaissance des informations ci-dessus et avoir obtenu les réponses à mes questions.
- J'accepte de plein gré de participer à cette recherche.
- J'accepte que mes données anonymisées concernant mon identité soient réutilisées pour tout projet ultérieur à finalité de recherche (à l'exclusion de toute exploitation à des fins commerciales), dans le respect des mêmes principes de confidentialité et de protection des informations personnelles que ce projet initial.

Nom :

Prénom :

Adresse postale ou adresse mail :

Date :

Signature (répondant) :

Annexe I Récupération de chaleur du laboratoire de champs magnétiques intenses : le LNCMI

Ce cas d'étude a fait l'objet de l'article « Optimisation multiacteurs appliquée à la valorisation de chaleur fatale d'un acteur industriel flexible », présenté dans la conférence IBPSA 2018 (Morriet et al. 2018). Cet article a accompagné la construction du métamodeleur OMEGAlpes et du modèle d'acteur, mais il a été réalisé en amont de ces productions. Ainsi la modélisation proposée ici n'a pas été développée sur le métamodeleur OMEGAlpes. En revanche, elle permet de présenter une analyse multiacteur pour un projet de valorisation de chaleur fatale.

Dans une première partie, nous présentons le cas d'étude et l'assemblage socio-énergétique envisagé dans le cadre de ce travail. Dans une seconde partie, nous présentons sa formulation en problème d'optimisation MILP. Une troisième partie nous permet de présenter les résultats obtenus avant de conclure.

a) Présentation du cas d'étude

Le cas d'étude est situé sur la Presqu'île de Grenoble. Il s'agit d'étudier la valorisation de la chaleur fatale émise par le Laboratoire National de Champs Magnétiques Intenses (LNCMI) lors de leurs expériences en la réinjectant dans le réseau de chaleur urbain de la ville de Grenoble. Le LNCMI, possède des installations électriques d'une puissance maximale de 24 MW avec une évolution prévue vers 30 MW en 2021. Sa consommation annuelle, de l'ordre de 14 à 18 GWh, permet de réaliser 2500 à 3000 h d'expériences sous champs magnétiques intenses. Cette énergie électrique est transformée en chaleur dans l'aimant pour champs intenses et les calories - environ 12 GWh - sont rejetées dans la rivière Isère par le biais d'un circuit d'eau de refroidissement. Le LNCMI dispose de flexibilité, car le planning d'expériences peut être modifié afin d'adapter sa production à la consommation des clients du réseau de chaleur. Ainsi, le LNCMI peut être considéré comme un acteur industriel flexible, représentatif d'acteurs électro-intensifs de plus en plus intégrés dans les tissus urbains (les sites industriels classiques ou émergents comme les data-centres). La ville de Grenoble dispose par ailleurs d'un réseau de chaleur, ce qui représente une opportunité pour la valorisation de la chaleur fatale du LNCMI. La chaleur est pour le moment produite à partir de cinq centrales utilisant un ou plusieurs combustibles parmi les déchets ménagers, le bois, les farines animales, le gaz, le charbon ou le fioul.

Afin d'optimiser la planification des consommations du LNCMI, un premier travail, décrit dans l'article « Valorisation optimale de chaleur fatale d'un site à très forte consommation électrique » (Pajot et al. 2017), a permis de modéliser le problème à partir de données fournies par le LNCMI sur ses activités d'une part et des consommations de chaleur du quartier mesurées d'autre part. Ce travail propose un outil d'aide à la conception pour une planification optimale d'expériences adaptée à la valorisation de chaleur fatale. Cependant, cette modélisation ne permet pas de comparer la calorie émise par le LNCMI avec celle produite par les centrales de production du réseau de chaleur urbain, dont les coûts de production et les émissions de CO2 varient en fonction des combustibles utilisés. Il nous semble donc intéressant d'affiner le modèle en modélisant ce réseau et les centrales associées. Ceci afin d'optimiser l'injection de chaleur dans le réseau urbain, et ainsi de disposer d'un outil permettant d'améliorer la performance énergétique, économique ou environnementale du projet. Dans cet article

nous nous concentrerons sur une optimisation des coûts de production, mais le même travail peut être réalisé pour optimiser les émissions de carbone.

Le cas d'étude Valocal amène à modéliser deux acteurs producteurs de chaleur : le LNCMI, fournissant de la chaleur de récupération ; et l'opérateur du réseau de chauffage urbain, fournissant de la chaleur à partir de centrales de production. La modélisation globale du problème nécessite d'ajouter les courbes de charges des consommateurs ainsi que les nœuds d'équilibre du réseau de chaleur (Figure 97).

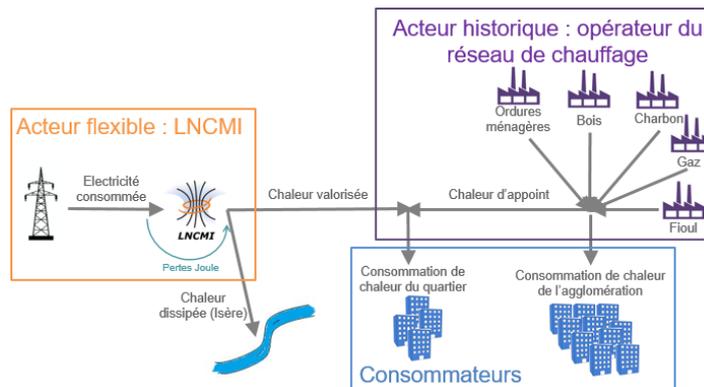


Figure 97 : Présentation du projet Valocal | Source : Auteure

Afin de décrire au mieux les acteurs, nous avons cherché à les modéliser à partir de leurs données d'entrée, de leurs contraintes et de leurs objectifs. Les contraintes sont modélisées sous forme d'équations. Les objectifs sont modélisés par des fonctions-objectifs, qui sont des fonctions linéaires que l'on cherche à maximiser ou à minimiser dans un problème d'optimisation linéaire.

b) Formulation du problème d'optimisation : approche méthodologique

Modèle du LNCMI

La modélisation du LNCMI est détaillée dans l'article « Valorisation optimale de chaleur fatale d'un site à très forte consommation électrique » (Pajot et al. 2017). Le LNCMI est modélisé par une unité de production convertissant l'électricité en chaleur, une unité de dissipation de chaleur dans la rivière Isère et une unité de valorisation de la chaleur alors injectée dans le réseau de chauffage urbain.

Afin de rendre viable le projet, il faut éviter que la valorisation de la chaleur entraîne des coûts supplémentaires pour les deux acteurs. Pour cela, nous avons associé un coût à la chaleur valorisée C_{LNCMI_valo} . Il faut donc que le budget final du LNCMI, constitué des coûts de fonctionnement du LNCMI C_{LNCMI_prod} - comprenant des surcoûts de fonctionnement aux périodes où l'électricité est plus chère et dus au fonctionnement des pompes à chaleur - auquel on soustrait le revenu associé à la valorisation de chaleur C_{LNCMI_valo} , soit inférieur au budget du LNCMI avant le projet de valorisation B_{LNCMI_to} , donnée fournie par le LNCMI. La contrainte (18) est ajoutée sous forme d'inéquation.

$$C_{LNCMI_prod} - C_{LNCMI_valo} \leq B_{LNCMI_to} \quad (18)$$

Modèle de l'opérateur du réseau de chauffage urbain

L'Opérateur de Réseau de Chauffage Urbain (ORCU) gère cinq centrales réparties sur l'agglomération. Ces cinq centrales utilisent un ou plusieurs combustibles - déchets ménagers, bois, farines animales, gaz, charbon ou fioul - pour produire de la chaleur. Pour alléger la modélisation, nous avons choisi de modéliser cinq unités de production associées chacune à un seul combustible (*Figure 97*). Les farines animales ont été modélisées avec le bois car elles sont brûlées avec celui-ci. Chaque centrale est définie à partir de puissances minimale et maximale de production de chaleur pour chaque combustible. Nous avons fait l'hypothèse d'un ordre de priorité dans la mise en route des centrales crédible d'un point de vue industriel. Cet ordre de priorité est défini sous forme de contraintes, i.e. d'inéquations (19). La variable u_{centrale} est une variable binaire, en fonctionnement $u_{\text{centrale}} = 1$.

$$u_{2\text{ème_centrale}} [t] \geq u_{1\text{ère_centrale}} [t] \quad (19)$$

Cherchant à optimiser la valorisation de chaleur d'un point de vue économique et environnemental, nous avons représenté le prix unitaire de la calorie en fonction des combustibles à partir des informations disponibles dans les archives de la ville de Grenoble (Ville de Grenoble 2013) ainsi que le coefficient des émissions de CO₂¹²¹ (SVDU 2012) présentés dans le tableau ci-dessous.

Nom des centrales	Prix unitaire de la calorie selon le combustible : été / hiver (€/MWh)	Coefficient d'émissions de CO ₂ (kgeCO ₂ /MWh)
Ordures Ménagères	15,4 / 34,8	149
Bois	32,7	13
Charbon	33,1	343
Gaz	85,5 / 94,5	206
Fioul	100	282

Tableau 20 : Récapitulatif des données de modélisation des centrales | Source : Auteure

Les variables définies lors de l'optimisation sont les suivantes : le fonctionnement binaire de la centrale $u_{\text{centrale}}(t)$ et la puissance des centrales $P_{\text{centrale}}(t)$ à chaque instant ; ainsi que l'énergie produite E_{centrale} , le coût total C_{centrale} et les émissions de CO₂ $CO_{2_centrale}$ sur la durée de l'optimisation.

De même que pour le LNCMI, il est nécessaire que l'ORCU ne perde pas d'argent dans la vente de chaleur par rapport à la situation initiale sans valorisation de chaleur. Cette condition est modélisée par l'équation (20) dans notre modèle. Ainsi, le budget final de l'ORCU constitué de la somme des coûts

¹²¹ MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE, *arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine*, Journal officiel, n°225, 28 septembre 2006.

de production des centrales $\sum_{Centrale} C_{Centrale}$ et du coût associé à la valorisation de la chaleur C_{LNCMI_valo} doit rester inférieur au budget initial de l'ORCU avant le projet de valorisation B_{ORCU_t0} . Le calcul du budget initial de l'opérateur réseau est détaillé dans la partie 0.

$$\sum_{Centrale} C_{Centrale} + C_{LNCMI_valo} \leq B_{ORCU_t0} \quad (20)$$

Modélisation des autres objets énergétiques du modèles

Pour compléter la modélisation du problème, il est aussi nécessaire de modéliser les charges ainsi que les nœuds d'équilibre du réseau.

Modèle des charges

Notre problème nécessite de modéliser deux charges : les consommations de la Presqu'île $P_{Lpi}(t)$ et celle de l'agglomération grenobloise hors Presqu'île $P_{Lagglo}(t)$ (cf. Figure 97). Les charges sont définies par des données d'entrée, basées sur des données de consommation de 2015. Il est nécessaire de modéliser les consommations de l'ensemble de l'agglomération grenobloise, en plus de celle de la Presqu'île, à cause de la modélisation des centrales de l'ORCU. En effet, les bornes de fonctionnement des puissances de mise en route des centrales correspondent à la demande de l'agglomération et de la Presqu'île.

Modèle du réseau de chaleur

Afin d'assurer l'équilibre production - consommation aux différents nœuds du réseau de chaleur (Figure 97), les équations (21) et (22) sont ajoutées au modèle. Dans notre cas d'étude, seuls les consommateurs de la Presqu'île peuvent bénéficier de la chaleur produite par le LNCMI.

$$P_{Lagglo}(t) + P_{Lappoint}(t) = \sum_{Centrale} P_{Centrale}(t) \quad (21)$$

$$P_{Lpi}(t) = P_{LNCMI_valorisee}(t) + P_{Lappoint}(t) \quad (22)$$

Optimisation du problème Valocal

Optimisation principale

L'optimisation a pour but de définir des plannings d'expériences pour le LNCMI et de production en fonction des combustibles pour l'ORCU optimaux vis-à-vis des objectifs des acteurs. Ci-dessous, la fonction-objectif économique (23), qui cherche à minimiser les coûts des deux acteurs, i.e. les budgets finaux des deux acteurs. Afin de prendre en compte le caractère multiacteur du projet, un coefficient de pondération α , compris entre 0 et 1, permet de faire varier le poids des acteurs dans l'optimisation. Cette approche permet de calculer des combinaisons de solutions optimales en fonction des coûts des acteurs. Cet ensemble de solutions constituent un front de Pareto. Les deux acteurs pourront ensuite trouver un compromis parmi cet ensemble.

Le budget final de l'ORCU est bien supérieur au budget final du LNCMI, car il correspond à la production de chaleur pour l'agglomération, en plus de la Presqu'île. Dans le but de donner le même poids aux deux acteurs dans la décision, nous avons soustrait le coût de la production de chaleur pour l'agglomération C_{agglo} au coût total de production de l'ORCU $\sum_{Centrale} C_{Centrale}$. Le budget final de

l'ORCU correspond alors aux coûts de production des centrales de l'ORCU pour la Presqu'île, auxquels s'ajoute le coût pour la chaleur valorisée s'il y en a un (24). Le budget final du LNCMI correspond quant à lui aux coûts de consommation d'électricité $C_{LNCMI\ prod}$, auxquels on peut soustraire le revenu de la chaleur valorisée (25).

$$\text{Min} [(1-\alpha) * B_{LNCMI_tf} + \alpha * B_{ORCU_tf}] \quad (23)$$

$$\text{avec : } B_{ORCU_tf} = \sum_{Centrale} C_{Centrale} - C_{agglo} + C_{LNCMI\ valo} \quad (24)$$

$$B_{LNCMI_tf} = C_{LNCMI\ prod} - C_{LNCMI\ valo} \quad (25)$$

Calcul du coût de production de chaleur par l'ORCU pour l'agglomération hors Presqu'île

Pour calculer le coût de la production de chaleur pour l'agglomération, il faut réaliser en amont de l'optimisation principale une optimisation de la production de chaleur de l'ORCU, tout en répondant aux consommations de l'agglomération hors Presqu'île (cf. Figure 98). La fonction-objectif alors la suivante :

$$\text{Min} \sum_{centrale} C_{Centrale} \quad (26)$$

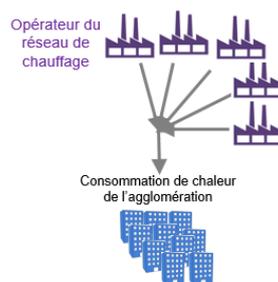


Figure 98 : Optimisation t0 ORCU hors Presqu'île | Source : Auteure

Calcul du coût de production de chaleur par l'ORCU avant le projet de valorisation

Pour calculer le coût de production de l'ORCU avant le projet de valorisation de chaleur, il suffit d'optimiser la production de chaleur de l'ORCU tout en répondant aux consommations de l'agglomération et de la Presqu'île (cf. Figure 99). Cette optimisation sera appelée « optimisation t0 ORCU ». La fonction-objectif est alors la suivante :

$$\text{Min} \sum_{centrale} C_{Centrale} \quad (27)$$

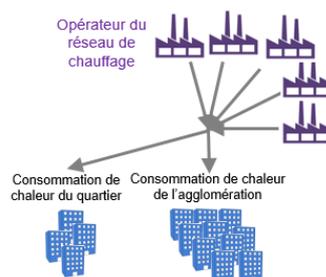


Figure 99 : Optimisation t0 ORCU | Source : Auteure

c) Résultats & discussion

Une fois le cas d'étude défini, nous avons cherché à valider la modélisation de l'opérateur du réseau de chaleur. Pour cela, nous avons comparé le mix énergétique de l'agglomération grenobloise au mix énergétique calculé. Ensuite, nous avons cherché à produire des résultats qui pourraient servir de supports de discussion entre les acteurs.

Cohérence des résultats d'optimisation

Pour valider la cohérence de la modélisation de l'ORCU, nous avons choisi de comparer (Tableau 21) le mix énergétique de la métropole Grenobloise de l'année 2015/2016 (Grenoble Alpes Métropole 2018) avec le mix énergétique calculé lors de l'optimisation t0 ORCU.

Combustibles	Mix énergétique 2015/2016	Mix énergétique de la modélisation
Ordures Ménagères	35,7%	37,5%
Bois & farines animales	28,1%	32%
Charbon	22,9%	29%
Gaz	10%	1,5%
Fioul	3,3%	0%

Tableau 21 : Comparaison des mix énergétiques 2015/2016 et modélisé | Source : Auteure

On peut observer que l'ordre en proportion des combustibles consommés est respecté. De plus, on observe une cohérence dans les proportions, même si elles ne sont pas identiques. Les différences peuvent s'expliquer par la modélisation simplifiée des centrales – associées à un seul combustible – et par des contraintes des centrales et du réseau de chaleur urbain qui n'ont pas été modélisées en détail. Par exemple, certaines centrales auraient besoin d'ajouter du charbon ou du fioul, en plus du bois, à partir d'une certaine puissance. Ces contraintes manquantes peuvent expliquer le manque de fioul et de charbon dans les résultats du modèle par rapport au mix énergétique mesuré. S'agissant d'un outil d'aide à la conception et non de gestion temps réel, et n'ayant pas plus d'informations sur les contraintes de fonctionnement, nous avons considéré que le niveau de finesse était suffisant dans le cas de cette première étude.

Résultats et problématiques multiacteurs

Afin de montrer l'impact du tarif de valorisation de la chaleur sur le fonctionnement des centrales au niveau de la Presqu'île, nous avons choisi de représenter le mix énergétique de la Presqu'île pour deux tarifs de valorisation différents :

- 33€/MWh (cf. Figure 100) le prix est alors entre celui du bois et celui du charbon,
- 95€/MWh (cf. Figure 101) le prix est alors entre celui du gaz et du fioul.

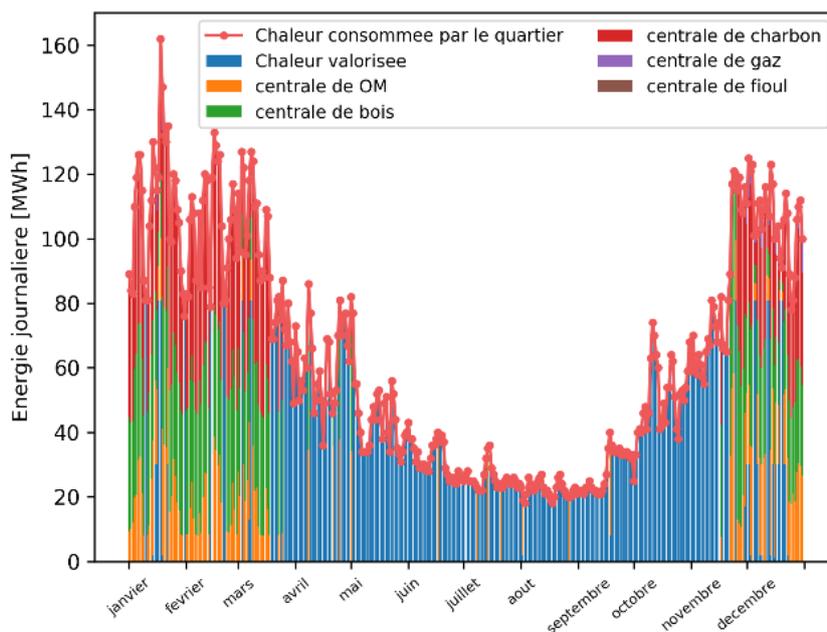


Figure 100 : Mix Presqu'île valorisation 33€/MWh | Source : Auteur

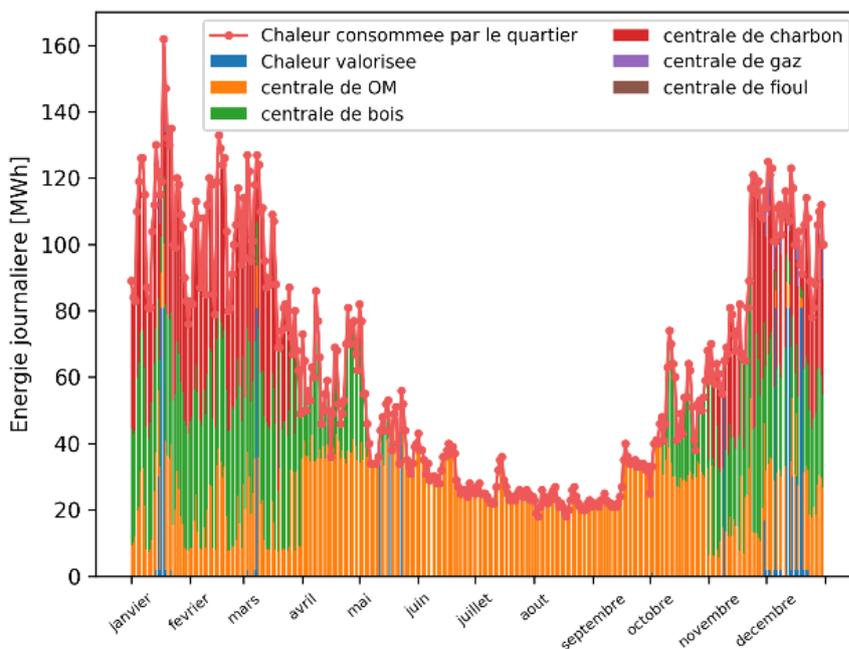


Figure 101 : Mix Presqu'île valorisation 95€/MWh | Source : Auteur

Ces graphiques mettent en évidence que la proportion des combustibles utilisés pour produire la chaleur aux consommateurs de la Presqu'île dépend du prix de la calorie à valoriser. Ceci implique que le taux de valorisation de la chaleur est fortement dépendant du prix fixé. Le prix de la calorie valorisée doit être un compromis, permettant au LNCMI de produire de la chaleur au moment où la Presqu'île consomme tout en maximisant le taux de valorisation. Ces deux cas présentent un intervalle de prix pour la valorisation qui permettrait de répondre à ces critères.

L'utilisation d'une courbe de Pareto peut aussi servir de base de discussion entre les acteurs pour trouver un compromis et permettre la mise en place du projet. C'est pourquoi nous avons cherché à tracer la frontière de Pareto ci-dessous, correspondant à un coût de valorisation de 33€/MWh.



Figure 102 : Frontière de Pareto pour un coût de valorisation de 33€/MWh | Source : Auteure

Ce graphique met en évidence les coûts pour chaque acteur, selon que l'on souhaite minimiser les coûts de l'ORCU, ceux du LNCMI ou choisir un entre-deux. On observe plusieurs solutions avec des coûts différents pour le LNCMI et l'ORCU, même si les variations sont assez faibles. La discontinuité du front de Pareto pourrait s'expliquer par le fait que les puissances minimales de mise en route des centrales sont non nulles, et donc que la mise en route des centrales se fait par échelon.

d) Conclusion et perspectives pour l'outil

Cet article a permis de présenter un cas d'étude de valorisation de chaleur. L'article a mis en évidence plusieurs acteurs et proposé une modélisation technico-économique associée aux acteurs et aux éléments techniques. Une première optimisation a permis d'évaluer la cohérence de la modélisation vis-à-vis des données du problème. L'importance de l'hypothèse simplificatrice d'avoir un seul combustible par centrale reste à évaluer, mais cela nécessiterait plus d'informations sur le fonctionnement du réseau de chaleur. Une seconde optimisation nous a permis de produire des graphiques, dont une courbe de Pareto, qui peuvent servir de supports de discussion entre les acteurs.

a) Articles de conférence

Morriet, Lou, Camille Pajot, Benoit Delinchant, Yves Maréchal, Frédéric Wurtz, François Debray, et Benjamin Vincent. 2018. « Optimisation multiacteurs appliquée à la valorisation de chaleur fatale d'un acteur industriel flexible ». In *IBPSA 2018*. Bordeaux.

Morriet, Lou, Gilles Debizet, et Frédéric Wurtz. 2019. « Multi-Actor Modelling for MILP Energy Systems Optimisation: Application to Collective Self-Consumption ». In *Building Simulation 2019*. Rome. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02285965>.

Pajot, Camille, Lou Morriet, Sacha Hodencq, Benoît Delinchant, Yves Maréchal, Frédéric Wurtz, et Vincent Reinbold. 2019. « An Optimization Modeler as an Efficient Tool for Design and Operation for City Energy Stakeholders and Decision Makers ». In *Building Simulation 2019*. Rome. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02285954>.

Morriet, Lou, Frédéric Wurtz, Gilles Debizet. 2020. « Analyse qualitative pour la modélisation de contraintes et d'objectifs des parties prenantes d'un projet énergétique local ». In *Communautés énergétiques, autoproduction, autoconsommation : cadrages, pratiques et outils*. <https://ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr/scientific-production/energy-communities-webinars/session-3-which-skills-and-tools-to-support-energy-communities--845789.htm?RH=1601539548658>.

Morriet, Lou, Benoit Delinchant, Frédéric Wurtz, Gilles Debizet. 2021. « Algorithme d'identification de contraintes incompatibles pour les problèmes d'optimisation : application à un projet énergétique ». En soumission à *IBPSA 2021*. Reims.

Fito, Jaume, Julien Ramousse, Sacha Hodencq, Lou Morriet, Frédéric WURTZ, et Gilles Debizet. 2020. « Analyse technico-économique multiacteurs de la conception d'un système de valorisation de chaleur fatale sur réseau de chaleur ». In *Communautés énergétiques, autoproduction, autoconsommation : cadrages, pratiques et outils*. <https://ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr/scientific-production/energy-communities-webinars/session-3-which-skills-and-tools-to-support-energy-communities--845789.htm?RH=1601539548658>.

Hodencq, Sacha, François Debray, Christophe Trophime, Benjamin Vincent, Benoit Stutz, Benoit Delinchant, Frédéric Wurtz, et al. 2019. « Thermohydraulique des champs magnétiques intenses : des microns jusqu'à l'échelle des communautés urbaines ». In *24ème Congrès Français de la Mécanique*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02485061>.

Pajot, Camille, Benoit Delinchant, Yves Maréchal, Frédéric Wurtz, Lou Morriet, Benjamin Vincent, et François Debray. 2018. « Industrial Optimal Operation Planning with Financial and Ecological Objectives ». In *SMARTGREENS*. Vol. 1. <https://doi.org/10.5220/0006705202140222>.

b) Table ronde

Dumas, Philippe, Michel Teule, Frédéric Rychen, Lou Morriet, Rabab Akkouche, Ruby Ganchou, Séverine Mignot, Vanessa Casacci, et Vincent Tosseli. 2019. « TABLE RONDE : Comment intégrer efficacement les utilisateurs finaux dans le design de vos solutions Smart Energy ? » Aix-en-Provence, novembre 8. https://www.flexgrid.fr/wp-content/uploads/2019/10/programme_shs_8_novembre_2019.pdf.

c) Vidéo

Debizet Gilles, Lou Morriet, Xavier Oster, Marta Pappalardo, Nelly Vallance, Frédéric Wurtz. 2019. « Autoconsommation collective d'électricité » réalisé par Black Sheep Studio. Youtube, 0:01:58. <https://ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr/scientific-production/videos/autoconsommation-collective-d-electricite/autoconsommation-collective-d-electricite-844661.htm?RH=1564151634350>

Table des figures

Figure 1 : Différence entre l'objectif annoncé et l'augmentation réelle d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie Source : (Phan et Plouhinec 2020, 15).....	12
Figure 2 : Représentation schématique des apports de la thèse pour les métamodeleurs d'optimisation Source : Auteure	15
Figure 3 : Répartition des rôles pour un réseau de chauffage urbain Source : Adaptée de Cerema .	21
Figure 4 : Nombre d'installations photovoltaïques en fonction du type de raccordement Source : Auteure, basée sur les données Enedis issues de la page « Le Mix par Enedis ».....	24
Figure 5 : Nombre d'installations éoliennes en fonction du type de raccordement Source : Auteure, basée sur les données Enedis issues de la page « Le Mix par Enedis »	24
Figure 6 : Représentation spatiale des premiers développement du réseau de chaleur du projet de valorisation de chaleur au Val d'Europe Source : (Hampikian 2017, 215) à parti d'un fond Google Earth (16/05/2016)	31
Figure 7 : Représentation spatialisée du projet d'autoconsommation collective à Marmagne Source : (Aubert 2020, 186)	31
Figure 8 : Représentation graphique du principe de foisonnement Source : Cerema, page « Foisonnement - Réseaux de chaleur et territoires ».....	34
Figure 9 : Surface de captation nécessaire pour produire 1 kWh pendant 1 h Source : Adapté de Avenir Climatique	35
Figure 10 : Catégories d'acteurs impliqués dans les projets de transition énergétique selon l'IAU IdF Source : (Vaisman et al. 2018, 19).....	45
Figure 11 : Catégories d'acteurs identifiés dans le cadre du projet Nexus Source : Auteure - extrait de Nivo, issus des travaux de recherche Eco quartier-Nexus-Énergie	46
Figure 12 : Représentation graphique des acteurs énergétiques d'un SELBC avec leur nœud socio-énergétique Source : Auteure	49
Figure 13 : Représentation graphique des acteurs indirectement engagés dans la conception et dans l'opération d'un SELBC, avec leur domaine de responsabilité potentiel associé, ainsi que des éléments naturels Source : Auteure.....	51
Figure 14 : Représentation du paradoxe d'information-décision et l'importance des phases de d'études préliminaires Source : (HOAI 2013) in (Hollberg et al. 2019)	56
Figure 15 : Les trois phases d'un outil d'aide à la conception Source : Auteure	61
Figure 16 : Penser les métamodeleurs comme supports de synchronisation cognitive et de négociation Source : Auteure	62
Figure 17 : De la bibliothèque de modèles au modèle Source : Auteure	63
Figure 18 : Extrait d'un notebook Jupyter intégrant texte, image et code Source : Auteure	65
Figure 19 : Intérêt de la modélisation orientée objet : agrément de la bibliothèque à partir de cas d'études Source : Auteure	66
Figure 20 : Répartition des métamodeleurs en fonction de leur caractéristique d'accès Source : Auteure.....	72
Figure 21 : Itérations possibles lors de la conception Source : (Brisset 2007)	73
Figure 22 : Formulation générique d'un problème d'optimisation MILP et les entrées (et les sorties) associées discutées par les parties prenantes Source : Auteure.....	74

Figure 23 : Représentation d'un espace de recherche à deux variables Source : Auteure	76
Figure 24 : Représentation du domaine de faisabilité défini par les contraintes au sein de l'espace de recherche Source : Auteure	77
Figure 25 : Représentation de l'orientation de l'objectif Maximiser x_1+x_2 dans le domaine de faisabilité ainsi que des solutions optimales identifiables Source : Auteure.....	80
Figure 26 : Représentation graphique de solutions dominées (dont C) et d'un front de Pareto formé par des solutions optimales (dont A et B) Source : Auteure, inspirée de (Recht 2016, 69).....	81
Figure 27 : Comparaison de deux fronts de Pareto pour deux technologies d'alternateurs différentes Source : (Albert 2004, 113).....	82
Figure 28 : Diagramme de classes associé à un projet d'autoconsommation collective Source : Auteure.....	83
Figure 29 : Diagramme d'objets associé à un projet d'autoconsommation collective Source : Auteure	84
Figure 30 : Représentation RES d'un système énergétique Source : Auteur	84
Figure 31 : Représentation graphique des unités énergétiques Source : (Pajot 2019).....	85
Figure 32 : Modélisation des objectifs et des contraintes Source : (Pajot 2019).....	85
Figure 33 : Représentation associée aux flux d'énergie, nœuds énergétiques et variables d'intérêt Source : (Pajot 2019)	85
Figure 34 : Représentation graphique d'un cas d'étude d'autoconsommation individuelle Source : (Pajot 2019)	86
Figure 35 : Exemple de fronts de Pareto 2D (à gauche) et 3D (à droite) Source : (Raad 2017)	87
Figure 36 : Exemple de courbe de chaleur Source : (Raad 2017).....	87
Figure 37 : Représentation graphique d'un front de Pareto à trois variables Source : page « Pareto slider »	88
Figure 38 : Ensemble des solutions étudiées sans intégration des contraintes du constructeur (en bleu) et avec (en vert) Source : (Recht 2016)	91
Figure 39 : Briques développées pour accompagner la négociation des parties prenantes Source : Auteure.....	96
Figure 40 : Diagramme des classes pour les unités énergétiques d'OMEGAAlpes Source : Auteure à partir de (Pajot et al. 2019)	97
Figure 41 : Représentation d'un système énergétique modélisable à partir de la bibliothèque OMEGAAlpes Source : Auteure.....	98
Figure 42 : Du métamodeleur OMEGAAlpes au solveur Source : Auteure.....	99
Figure 43 : Création de trois types de contraintes : DefinitionConstraint, TechnicalConstraint et ActorConstraints et héritage Source : Auteure	102
Figure 44 : Insertion possible des méthodes LPFICS et Ruby-CBC vis-à-vis d'OMEGAAlpes Source : Auteure.....	103
Figure 45 : Représentation graphique du fonctionnement global de la méthode find_incompatible_constraint_set Source : Auteure à partir de (Junker 2004).....	104
Figure 46 : Représentations et symboles pour les unités énergétiques Source : Auteure basée sur (Pajot 2019)	106
Figure 47 : Association des objectifs et des contraintes aux unités pour la représentation graphique Source : Auteure.....	106

Figure 48 : Représentation graphique de l'acteur Source : Auteure basée sur la représentation UML	106
Figure 49 : Capture d'écran de l'interface graphique OMEGAlpes-web Source : Auteure	107
Figure 50 : De l'interface graphique au fichier Python Source : Auteure	108
Figure 51 : Front de Pareto par la méthode de pondération Source : (Gong 2011)	110
Figure 52 : Apport du chapitre IV : un modèle multiacteur explicite pour la modélisation des SELBC Source : Auteure.....	116
Figure 53 : Répartition des articles au cours du temps selon les mots clefs Source : Auteure.....	118
Figure 54 : Poids des objectifs selon les acteurs et représentation graphique des solutions Source : (González-Bravo, Fuentes-Cortés, et Ponce-Ortega 2017)	121
Figure 55 : Représentation imagée d'un agent en interaction avec son environnement et les autres agents Source : (Ferber 1997)	122
Figure 56 : Classe de l'acteur dans le cadre de la démarche Commod et lien de connaissance avec les ressources naturelles Source : (Barreteau et al. 2010)	122
Figure 57 : Différencier les questions techniques des questions liées aux acteurs et différencier les décisions portées par chaque acteur : s'interroger lors de la modélisation et faciliter les négociations Source : Auteure.....	125
Figure 58 : Diagramme de classe pour la classe Actor Source : Auteure	127
Figure 59 : Représentations graphiques pour le modèle d'acteur Source : Auteure	128
Figure 60 : Diagramme des classes pour les acteurs dans le métamodeleur OMEGAlpes Source : Auteure.....	131
Figure 61 : Représentation de la modélisation multiacteur intégrant les acteurs opérateurs Source : Auteure, à partir de (Morriet, Debizet, et Wurtz 2019).....	132
Figure 62 : « Ceci n'est pas un acteur » Source : Auteure, inspirée de (Magritte 1928).....	134
Figure 63 : Apport du chapitre IV : un modèle d'acteurs explicite et une méthodologie d'analyse associée Source : Auteure	139
Figure 64 : Schéma de principe d'un projet d'autoconsommation collective en juin 2016 Source : Auteure, à partir de (Banner 2017)	146
Figure 65 : Schéma de principe d'un projet d'autoconsommation collective en février 2017 Source : Auteure.....	147
Figure 66 : Schéma de principe d'un projet d'autoconsommation collective en mai 2019 Source : Auteure.....	147
Figure 67 : Représentation graphique de la récupération de chaleur pour la deuxième captation chez ArcelorMittal Source : Rapport technique de l'exploitation du réseau pour l'exercice 2008 dans (Hampikian 2017)	149
Figure 68 : Nœuds pour le codage des ressources renouvelables Source : Auteure - extrait de Nivo	151
Figure 69 : Nœuds pour le codage des vecteurs énergétiques Source : Auteure - extrait de Nivo .	152
Figure 70 : Nœuds pour le codage des propriétés et des caractéristiques techniques des SELBC Source : Auteure - extrait de Nivo	153
Figure 71 : Nœuds pour le codage des acteurs Source : Auteure - extrait de Nivo	154
Figure 72 : Nœuds pour le codage des raisons influentes Source : Auteure - extrait de Nivo.....	155
Figure 73 : Nœuds pour le codage des thématiques pour les raisons influentes Source : Auteure - extrait de Nivo	156

Figure 74 : Nœuds pour le codage VRAC en lien avec les raisons influentes Source : Auteure - extrait de Nivo.....	157
Figure 75 : Codage VRAC Source : Auteure - extrait de Nivo	157
Figure 76 : Méthodologie pour l'identification et la modélisation des contraintes et objectifs d'acteurs dans l'outil d'aide à la conception Source : Auteure	158
Figure 77 : Tableau de répartition des citations et verbatims portant sur les raisons influentes en fonction des types d'acteurs pour le cas d'étude de Dunkerque Source : Auteure - extrait de Nivo	160
Figure 78 : Identification de la zone géographique pour un projet d'autoconsommation collective Source : Auteure à partir de la page « Calculateur de rayon de carte »	184
Figure 79 : Identification des bâtiments potentiels à partir du cadastre solaire Source : Auteure à partir de la page « cadastre solaire »	184
Figure 80 : Potentiel solaire et coûts d'installation envisagé pour un bâtiment de la zone Source : page « Cadastre solaire »	185
Figure 81 : Représentation de l'assemblage socio-énergétique dans le cadre d'un projet d'autoconsommation individuelle pour les dix habitations Source : Auteure	187
Figure 82 : Représentation de l'assemblage socio-énergétique dans le cadre d'un projet d'autoconsommation collective pour les dix habitations Source : Auteure	187
Figure 83 : Courbe de charge pour les 10 unités de consommation sur 48 h Source : Auteure.....	188
Figure 84 : Représentation graphique des taux d'autoconsommation et d'autoproduction Source : Auteure à partir de la page « Ce qu'il faut savoir pour comprendre l'autoconsommation ».....	189
Figure 85 : Évolution de la production en fonction de l'objectif de maximiser le taux d'autoconsommation (A), de maximiser le taux d'autoproduction (B) et de maximiser la corrélation entre production des panneaux et consommation (C) Source : Auteure	192
Figure 86 : Illustration du choix du nombre de panneaux pour l'optimisation du taux d'autoconsommation Source : Auteure	193
Figure 87 : Front de Pareto dans le cas du problème de référence (A) et dans le cas d'un problème imaginaire (B) avec en faisant varier α entre 0 et 1 avec un pas de 0,05 Source : Auteure	195
Figure 88 : Représentation graphique du modèle du projet Source : (Morriet et al. en cours de soumission).....	229
Figure 89 : Représentation du système énergétique du réseau de chaleur urbain à base d'eau de mer à partir de la théorie des acteurs réseaux et des assemblages urbains Source : Simon Guy (Rydin et al. 2013).....	238
Figure 90 : Représentation graphique du système énergétique du réseau de chaleur de Fontaine Source : (Debizet, Yalçın-Riollet, et Tabourdeau 2018).....	239
Figure 91 : Représentation spatialisée du projet d'autoconsommation collective à Marmagne Source : (Aubert 2020)	240
Figure 92 : Tableau de répartition des citations et verbatims portant sur les raisons influentes en fonction des types d'acteurs pour le cas d'étude de Marmagne Source : Auteure - extrait de Nivo	241
Figure 93 : Représentation graphique du SELBC, et des nœuds socio-énergétiques associés, porté par l'habitat participatif Source : Auteure	248

Figure 94 : Tableau de répartition des citations et verbatims portant sur les raisons influentes en fonction des types d'acteurs pour le cas d'étude de Forcalquier Source : Auteure - extrait de Nivo	249
Figure 95 : Représentation graphique du projet de récupération de chaleur issue du data center Source : (Hampikian 2017)	255
Figure 96 : Tableau de répartition des citations et verbatims portant sur les raisons influentes en fonction des types d'acteurs pour le cas d'étude de Val d'Europe Source : Auteure - extrait de Nivo	256
Figure 97 : Présentation du projet Valocal Source : Auteure	270
Figure 98 : Optimisation t0 ORCU hors Presqu'île Source : Auteure.....	273
Figure 99 : Optimisation t0 ORCU Source : Auteure.....	273
Figure 100 : Mix Presqu'île valorisation 33€/MWh Source : Auteure	275
Figure 101 : Mix Presqu'île valorisation 95€/MWh Source : Auteure	275
Figure 102 : Frontière de Pareto pour un coût de valorisation de 33€/MWh Source : Auteure	276

Table des tableaux

Tableau 1 : Catégories des types d'acteurs des SELBC selon leur rôle Source : Auteure	53
Tableau 2 : Présentation de trois paradigmes : « conventionnel » (grands systèmes énergétiques), « nouveau » (systèmes d'énergies renouvelables « classiques ») et les SELBC (nos ajouts sont en italique) Source : Auteure (italique) à partir de (Bulkeley et Castan Broto, Vanesa 2012)	54
Tableau 3 : Tableau comparatif des approches mixtes : MILP, P-MILP et MINLP Source : (Pajot 2019)	68
Tableau 4 : Tableau de comparaison des métamodeleurs Source : Auteure.....	71
Tableau 5 : Modification des couleurs pour la représentation des vecteurs énergétiques Source : Auteure.....	106
Tableau 6 : Nombre d'articles identifiés en fonction des mots clefs Source : Auteure	117
Tableau 7 : Nombres d'articles identifiés en fonction de l'approche proposée pour la prise en compte de la multiplicité des acteurs Source : Auteure.....	118
Tableau 8 : Synthèse des contraintes et objectifs identifiés pour les acteurs opérateurs Source : Auteure.....	171
Tableau 9 : Synthèse des contraintes et objectifs identifiés pour les acteurs opérateurs Source : Auteure.....	175
Tableau 10 : Résultats des optimisations pour les projets d'autoconsommation individuelle et d'autoconsommation collective Source : Auteure	191
Tableau 11 : Tableau de comparaison entre une modélisation imaginaire et non imaginaire Source : Auteure.....	193
Tableau 12 : Présentation du paradigme associé aux systèmes énergétiques locaux bas-carbone en comparaison avec le paradigme énergétique conventionnel Source : Auteure à partir de (Bulkeley et Castan Broto, Vanesa 2012)	197
Tableau 13 : Classification d'articles scientifiques selon qu'ils proposent des revues d'outils, de modèles, d'approches mathématiques et/ou d'algorithmes de résolution pour les systèmes énergétiques Source : Auteure.....	228
Tableau 14 : Comparaison des méthodologies selon les solveurs Source : Auteure	230
Tableau 15 : Validation de l'identification des contraintes selon le type Source : Auteure	232
Tableau 16 : La prise en compte des parties prenantes dans les projets énergétiques : classification d'articles scientifiques selon le mode de prise en compte Source : Auteure	237
Tableau 17 : Synthèse des contraintes et objectifs identifiés pour le projet d'autoconsommation collective de Marmagne Source : Auteure	247
Tableau 18 : Synthèse des contraintes et objectifs identifiés pour le projet d'autoconsommation collective des Colibres Source : Auteure	254
Tableau 19 : Synthèse des contraintes et objectifs identifiés pour le projet de valorisation de chaleur fatale du Val d'Europe Source : Auteure	265
Tableau 20 : Récapitulatif des données de modélisation des centrales Source : Auteure	271
Tableau 21 : Comparaison des mix énergétiques 2015/2016 et modélisé Source : Auteure	274

Table des encadrés

Encadré 1 : Le souhaite d'une production d'énergie locale : exemple avec le projet des Colibres.....	30
Encadré 2 : Une obligation de travailler avec le gestionnaire réseau : exemple des projets d'autoconsommation collective.....	32
Encadré 3 : Interdépendance entre production et consommation : exemple avec le projet de valorisation de chaleur fatale à Dunkerque	33
Encadré 4 : Incidence de la consommation sur la production : exemple avec le projet de valorisation de chaleur fatale au Val d'Europe	33
Encadré 5 : Assurer une consommation au moment où il y a de la production : exemple avec le projet des Colibres	34
Encadré 6 : Conception des SELBC au sein d'espaces urbanisés existants : exemple de projets photovoltaïques	36
Encadré 7 : La production issue de la valorisation de chaleur fatale n'est pas toujours adaptée : exemple avec le projet de valorisation de chaleur fatale au Val d'Europe.....	37
Encadré 8 : Mutualisation du système technique et difficulté d'accès aux installations : exemple avec le projet de valorisation de chaleur fatale à Dunkerque.....	37
Encadré 9 : Mutualisation du système technique et questions de propriété : exemple avec le projet de valorisation de chaleur fatale à Dunkerque	38
Encadré 10 : Consommateurs et flexibilité directe : exemple avec un projet d'autoconsommation collective.....	39
Encadré 11 : Acteur flexible vis-à-vis de la consommation : exemple avec le projet de valorisation de chaleur fatale à Grenoble.....	40
Encadré 12 : Acteurs flexibles vis-à-vis de leur production : exemple avec le projet de valorisation de chaleur fatale à Grenoble.....	41
Encadré 13 : Stockage (chaleur) et flexibilité : exemple avec un projet d'autoconsommation collective	42
Encadré 14 : La sobriété dans le cadre du projet GreenCity.....	43
Encadré 15 : Exemple d'un système énergétique simple modélisable avec OMEGAAlpes	98

Table des matières détaillée

SIGLES ET ABBREVIATIONS	5
SYMBLES MATHÉMATIQUES	7
UNITES	7
PREAMBULE	9
INTRODUCTION.....	11
ANALYSE DE SYSTEMES ÉNERGETIQUES LOCAUX BAS-CARBONE (SELBC) : UN CHANGEMENT DE PARADIGME A PRENDRE EN COMPTE POUR LA CONCEPTION DES SELBC	17
I.1 L'ÉMERGENCE DES SYSTEMES ÉNERGETIQUES LOCAUX BAS-CARBONE REMET EN CAUSE LA FRONTIÈRE QUI SÉPARE CLASSIQUEMENT LES FONCTIONS DE PRODUCTION ET DE FOURNITURE DE LA FONCTION DE CONSOMMATION.....	19
I.1.i <i>Le développement des grands systèmes énergétiques : un acteur unique et intégré de la production à la fourniture</i>	20
I.1.ii <i>La libéralisation de secteur électrique et gazier et l'introduction des énergies intermittentes dans le mix énergétique français.</i>	22
I.1.iii <i>L'émergence des systèmes énergétiques locaux bas-carbone : un rapprochement entre production et consommation qui doit composer avec l'héritage d'une vision centralisée</i>	26
I.2 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES SELBC ET MODALITÉS DE FONCTIONNEMENT À L'ORIGINE D'ENJEUX « SOCIO-TECHNIQUES »	29
I.2.i <i>Caractéristiques communes liées au SELBC</i>	29
I.2.i.a Ressource locale	29
I.2.i.b Ressource intermittente.....	30
I.2.i.c Multiconsommateur et possiblement multiproducteur : de l'échelle multilogement à l'échelle quartier.	30
I.2.i.d Connexion à un réseau de distribution	31
I.2.i.e Interdépendance entre production et consommation.....	32
I.2.i.f Bénéficiaire du foisonnement	33
I.2.ii <i>Caractéristiques spécifiques aux ressources ou au contexte et contraignantes.....</i>	34
I.2.ii.a Surface de captation importante.....	35
I.2.ii.b Conception de SELBC inscrite dans de l'existant : des contraintes limitant la production	35
I.2.ii.c La production issue de la valorisation de chaleur fatale n'est pas toujours adaptée à la consommation : une question de température.....	36
I.2.ii.d Mutualisation du système technique ou d'une partie : de nouvelles dépendances	37
I.2.iii <i>Modalités de fonctionnement.....</i>	38
I.2.iii.a Flexibilité de la consommation et de la production : valoriser la flexibilité des acteurs	38
I.2.iii.b Sobriété énergétique.....	42
I.2.iv <i>Du système énergétique à l'assemblage socio-énergétique.....</i>	43
I.3 ACTEURS DES SELBC.....	44
I.3.i <i>Typologie d'acteurs proposée par l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme Île-de-France (IAU IdF)</i>	45
I.3.ii <i>Typologie d'acteurs proposée dans le cadre du projet Nexus.....</i>	46
I.3.iii <i>Proposition d'une nouvelle typologie d'acteurs.....</i>	47
I.3.iii.a La notion des nœuds socio-énergétiques.....	47
I.3.iii.b Les acteurs des SELBC.....	47
I.3.iii.c Synthèse des acteurs des SELBC et regroupement en trois grandes catégories	52
I.4 UN NOUVEAU PARADIGME DES SYSTEMES ÉNERGETIQUES AVEC LES SELBC	54
I.5 QUELLES ÉVOLUTIONS DES OUTILS D'AIDE À LA CONCEPTION POUR ACCOMPAGNER LA CONCEPTION DE SYSTEMES ÉNERGETIQUES LOCAUX BAS-CARBONE?	55

1.5.i	1 ^{er} paradoxe : Alors que les informations sur le projet sont incertaines en phase de pré-étude (situation exacerbée dans le cas de projets émergents), les décisions prises par les parties prenantes ont le plus d'impact	55
1.5.ii	2 ^{ème} paradoxe : Alors que les SELBC impliquent une multitude d'acteurs dans la conception, les outils d'aide à la conception ont été développés pour un acteur unique	56
1.5.iii	3 ^{ème} paradoxe : Alors que les différents points de vue des parties formatent le SELBC conçu, ils ne sont pas pris en compte de manière explicite dans les modèles	57
CONCLUSION DU CHAPITRE I		58

OUTILS D'AIDE A LA CONCEPTION COMME SUPPORT DE SYNCHRONISATION COGNITIVE ET DE NEGOCIATION ENTRE LES PARTIES PRENANTES D'UN SELBC..... 59

II.1	OUTILS D'AIDE A LA CONCEPTION POUR QUE LE MODELE PUISSE ETRE SUPPORT DE NEGOCIATION	62
II.1.i	Travailler à partir de modèles compréhensibles : modélisation sous forme de concepts, modeleurs, métamodeleurs, interfaces et notebooks	62
II.1.i.a	La notion de concept dans les modèles	62
II.1.i.b	Du modeleur	63
II.1.i.c	... au métamodeleur avec bibliothèque de modèles	63
II.1.i.d	Jupyter Notebooks et interfaces graphiques	64
II.1.ii	Travailler à partir de modèles accessibles : l'open source	65
II.1.iii	Travailler à partir de modèles adaptables : open source et programmation orientée objet (POO)	65
II.1.iv	Modifier et tester le modèle à de nombreuses reprises : outil d'optimisation MILP	66
II.1.v	Synthèse des choix pour un outil d'aide à la conception adapté à la négociation et identification de plusieurs outils	68
II.2	LES ENTREES DU MODELE D'OPTIMISATION MILP COMME OBJETS DE DISCUSSION OU DE NEGOCIATION	73
II.2.i	Les variables et l'espace de recherche, points clefs de l'optimisation	74
II.2.i.a	Typologies de variables	75
II.2.i.b	L'espace de recherche basé sur les valeurs possibles des variables	76
II.2.ii	Les données du modèle comme objet de discussion	76
II.2.iii	Les contraintes du modèle comme objet de négociation	77
II.2.iii.a	Typologie de contraintes et degré de négociation	78
II.2.iii.b	Problème sur-contraint : nécessité d'identifier les contraintes pour pouvoir les négocier	78
II.2.iii.c	Problème sur-contraint : changement d'assemblage	79
II.2.iv	Les objectifs du modèle comme objet de discussion	79
II.3	LES SOLUTIONS DU MODELE COMME OBJET DE NEGOCIATION	80
II.3.i	Discuter des solutions « optimales » sur un même modèle : identification du front de Pareto	81
II.3.ii	Discuter des solutions optimales sur plusieurs modèles : comparer des fronts de Pareto	81
II.4	LES REPRESENTATIONS COMME SUPPORT DE SYNCHRONISATION COGNITIVE	82
II.4.i	Représentation du modèle	82
II.4.i.a	UML	83
II.4.i.b	Referenced Energy System	84
II.4.i.c	Représentation graphique « élémentaire » proposée par Pajot	85
II.4.ii	Représentation des solutions : le front de Pareto	86
II.5	REFLEXIONS SUR LES CONDITIONS D'UTILISATION DES METAMODELEURS D'OPTIMISATION POUR LA NEGOCIATION	88
II.5.i	Nécessité d'une négociation voulue par les acteurs	88
II.5.ii	Un modèle commun	89
II.5.iii	Une formulation commune	89
II.5.iv	Une asymétrie de savoir et de savoir-faire entre les parties prenantes	89
II.5.v	Un modèle partiel	90
II.5.vi	Modélisation subjective : une interprétation portée par les acteurs et non les outils	91
II.5.vii	Discuter de solutions non « optimales » : le front de Pareto comme référence	91

CONCLUSION DU CHAPITRE II	92
PROPOSITIONS DE BRIQUES COMPLEMENTAIRES POUR ACCOMPAGNER LA NEGOCIATION : APPLICATION SUR LE METAMODELEUR OMEGALPES	93
III.1 PRESENTATION DU METAMODELEUR OMEGALPES	96
III.1.i <i>Bibliothèque de modèles</i>	96
III.1.ii <i>Modeleur PuLP et solveur CBC</i>	98
III.2 LES VARIABLES DISCRETES OU LE DIMENSIONNEMENT « IMAGINAIRE » POUR FACILITER LA RESOLUTION	99
III.3 LES CONTRAINTES INCOMPATIBLES ET LEUR IDENTIFICATION SELON LEUR DEGRE DE NEGOCIATION	100
III.3.i <i>Modèle des différentes typologies de contraintes dans l'outil</i>	100
III.3.ii <i>Algorithmes d'identification de contraintes incompatibles : LPFICS</i>	102
III.3.iii <i>LPFICS et les différentes typologies de variables</i>	104
III.3.iv <i>Pistes d'amélioration pour l'identification des contraintes selon les typologies</i>	105
III.4 LE DEVELOPPEMENT D'UNE INTERFACE GRAPHIQUE	105
III.4.i <i>Propositions de modifications pour la représentation graphique proposée par Pajot</i>	105
III.4.ii <i>Interface graphique OMEGAlpes-Web basée sur cette représentation graphique</i>	107
III.4.iii <i>Limites et perspectives pour l'interface graphique</i>	108
III.5 LE CALCUL ET LA REPRESENTATION DES FRONTS DE PARETO	108
III.5.i <i>Méthode « ϵ-contrainte » – mal adaptée aux méthodes MILP</i>	109
III.5.ii <i>Méthode de pondération pour un ensemble de solutions – adaptée aux méthodes MILP</i>	109
III.5.iii <i>Tracer un front de Pareto pour deux objectifs</i>	110
III.5.iv <i>Tracer d'autres fronts de Pareto</i>	111
CONCLUSION DU CHAPITRE III	111
ARCHITECTURE D'UN MODELE MULTIACTEUR POUR LES PARTIES PRENANTES D'UN SELBC, DEVELOPPE POUR LES METAMODELEURS D'OPTIMISATION	113
IV.1 LA PRISE EN COMPTE DES ACTEURS DANS LES OUTILS D'AIDE A LA CONCEPTION	116
IV.1.i <i>La prise en compte des acteurs au sein des métamodeleurs identifiés</i>	116
IV.1.ii <i>La prise en compte des acteurs dans les outils d'aide à la conception, identifiée à partir d'une recherche par mots clefs</i>	117
IV.1.ii.a <i>Quatre approches pour la prise en compte des parties prenantes dans le cadre des projets énergétiques</i>	118
IV.1.ii.b <i>Deux catégories de modèles identifiées : la modélisation d'actions et la modélisation d'objectifs</i>	119
IV.1.iii <i>La modélisation multiagent : de l'action à l'interaction</i>	121
IV.1.iv <i>Synthèse et choix pour un modèle multiacteur dans la modélisation des SELBC</i>	123
IV.2 PROPOSITION D'UN MODELE POUR LES ACTEURS : MODELISATION PARCIMONIEUSE ET EFFECTIVE BASEE SUR LA MODELISATION ORIENTEE OBJET ET LE CONCEPT DE NCEUD SOCIO-ENERGETIQUE	124
IV.2.i <i>Différencier les questions techniques des questions liées aux acteurs et différencier les décisions portées par type d'acteur</i>	124
IV.2.ii <i>De l'acteur aux « raisons influentes » jusqu'à la modélisation des contraintes et des objectifs</i> ..	126
IV.2.iii <i>Modèle basé sur une approche orientée objet : la classe mère Actor</i>	126
IV.2.iv <i>Modèle limité aux parties prenantes</i>	128
IV.2.v <i>Séparation en trois typologies de parties prenantes : régulateurs, opérateurs et développeurs</i> ..	128
IV.2.vi <i>Prise en compte des nœuds socio-énergétiques des acteurs opérateurs via le domaine de responsabilité</i>	129
IV.2.vii <i>Modéliser les parties prenantes associées au SELBC avec OMEGAlpes</i>	132
IV.3 LIMITES DU MODELE D'ACTEUR PROPOSE	133
IV.3.i <i>Un modèle très partiel des acteurs, considéré (positivement) comme « parcimonieux » et « effectif »</i>	133

IV.3.ii	Une sélection des acteurs modélisés	134
IV.3.iii	Une complexification du processus de modélisation et du modèle	135
CONCLUSION DU CHAPITRE IV		135

ANALYSE QUALITATIVE POUR MODELISER LES PARTIES PRENANTES VIA LEURS CONTRAINTES ET OBJECTIFS
..... 137

V.1	METHODOLOGIES DE RECHERCHE ET D'ANALYSES EN SCIENCES SOCIALES : NOS CHOIX VIS-A-VIS DE NOTRE QUESTION DE RECHERCHE.....	140
V.1.i	Objet d'étude, question de recherche et hypothèses.....	140
V.1.ii	Techniques de recherche : enquêtes, observations et littérature grise	140
V.1.iii	Mener (ou non) une enquête qualitative.....	141
V.1.iv	Analyse : recours à un logiciel d'assistance au dépouillement de données qualitatives	141
V.2	METHODOLOGIE D'ANALYSE POUR L'IDENTIFICATION DES RAISONS INFLUENTES DES PARTIES PRENANTES.....	142
V.2.i	Choix des terrains : deux types de SELBC et quatre terrains retenus.....	143
V.2.i.a	SELBC basé sur de l'électricité produite à partir de panneaux photovoltaïques mutualisés dans le cadre de l'autoconsommation collective.....	144
V.2.i.b	SELBC basé sur de la chaleur fatale issue d'activités fortement consommatrices d'électricité en vue d'une réinjection dans un réseau de chaleur urbain	147
V.2.i.c	Présentation du terrain : récupération de chaleur industrielle pour réinjection dans un réseau de chaleur à Dunkerque.....	149
V.2.ii	Les monographies comme matériaux d'analyse.....	150
V.2.iii	Analyse hypothético-déductive et définition des nœuds	150
V.2.iii.a	Nœuds pour le codage des ressources renouvelables et de récupération.....	151
V.2.iii.b	Nœuds pour le codage des vecteurs énergétiques	151
V.2.iii.c	Nœuds pour le codage des propriétés et des caractéristiques	152
V.2.iii.d	Nœuds pour le codage des acteurs	153
V.2.iii.e	Nœuds pour le codage des raisons influentes.....	154
V.2.iii.f	Nœud pour le codage VRAC	157
V.2.iv	Synthèse de la méthodologie d'analyse pour l'identification des raisons influentes des parties prenantes.....	157
V.3	EXEMPLES DE RESULTATS DE L'ANALYSE ET PROPOSITION DE MODELISATION : APPLICATION AU CAS DE LA VALORISATION DE CHALEUR FATALE A DUNKERQUE	159
V.3.i	Acteur développeur.....	161
V.3.ii	Acteurs opérateurs	163
V.3.ii.a	Consommateurs	163
V.3.ii.b	Gestionnaire réseau chaleur.....	165
V.3.ii.c	Producteur.....	168
V.3.ii.d	Synthèse pour les acteurs opérateurs	170
V.3.iii	Acteurs régulateurs	171
V.3.iii.a	Autorités extérieures au projet	171
V.3.iii.b	Autorités locales	173
V.3.iii.c	Synthèse pour les acteurs régulateurs	174
V.3.iv	Acteurs indirectement engagés dans la conception et dans le fonctionnement SELBC.....	175
V.3.v	Éléments naturels	176
V.4	LIMITES DE L'ANALYSE ET DE LA MODELISATION ASSOCIEE	176
V.4.i	Retour sur la méthode d'analyse	176
V.4.i.a	Retour sur nos hypothèses	176
V.4.i.b	Une cohérence dans les types d'acteurs proposés.....	177
V.4.i.c	Des objets d'études limités	177
V.4.i.d	Application de la méthodologie sur des rapports de thèses	177
V.4.i.e	Identifier uniquement ce qui est indiqué par les acteurs	177

V.4.ii	<i>Retour sur la modélisation issue de l'analyse</i>	178
V.4.ii.a	Les acteurs non modélisés.....	178
V.4.ii.b	Les raisons influentes transformant l'assemblage non modélisées	179
V.4.ii.c	Les raisons influentes qualitatives non modélisées.....	179
V.4.ii.d	Les autres raisons influentes non modélisées	179
CONCLUSION DU CHAPITRE V		179
EXEMPLE D'APPLICATION : SELBC D'AUTOCONSOMMATION COLLECTIVE		181
VI.1	DES OUTILS POUR INITIER LE PROJET	183
VI.2	RECUPERATION ET ANONYMISATION DES DONNEES.....	185
VI.3	PRESENTATION DU CAS D'ETUDE ET DES ASSEMBLAGES SOCIO-ENERGETIQUES ETUDIES	186
VI.3.i	<i>Modélisation technique</i>	187
VI.3.ii	<i>Modélisation des acteurs : prosumers et personne morale</i>	188
VI.4	OPTIMISATION ET RESULTATS	191
VI.4.i	<i>Comparaison des résultats obtenus pour l'autoconsommation individuelle et l'autoconsommation collective en fonction de trois objectifs : maximiser le taux d'autoconsommation, maximiser le taux d'autoproduction et maximiser la corrélation entre production et consommation</i>	191
VI.4.ii	<i>Comparaison avec la modélisation imaginaire</i>	193
VI.4.iii	<i>Problème infaisable</i>	193
VI.4.iv	<i>Front de Pareto</i>	194
CONCLUSION DU CHAPITRE VI		195
CONCLUSION, PERSPECTIVES D'UTILISATION DE L'OUTIL ET DISCUSSION SUR L'INTERDISCIPLINARITE DE NOS TRAVAUX		197
SYNTHESE DE LA THESE.....		197
PERSPECTIVES D'UTILISATION DES TRAVAUX DE CETTE THESE.....		200
NOS TRAVAUX AU PRISME DE L'INTERDISCIPLINARITE.....		200
<i>Un travail basé sur les sciences pour l'ingénieur et les sciences sociales</i>		200
<i>Conditions de réalisation de la thèse</i>		201
<i>Des différences majeures entre les sciences pour l'ingénieur et les sciences sociales</i>		201
<i>Le dilemme de la simplification : de la complexité mise en évidence par les sciences sociales à la modélisation parcimonieuse nécessaire pour les outils</i>		202
<i>Pluridisciplinarité, interdisciplinarité ou transdisciplinarité : une thèse majoritairement interdisciplinaire</i>		202
REFERENCES		206
BIBLIOGRAPHIE.....		206
WEBOGRAPHIE ET LOGICIELS – PAR ORDRE DE MENTION DANS LA THESE		220
TEXTES REGLEMENTAIRES – PAR ORDRE DE MENTION DANS LA THESE		223
ANNEXES.....		226
ANNEXE A	CARTOGRAPHIE DES REVUES D'OUTILS, DE MODELES, D'APPROCHES MATHEMATIQUES ET D'ALGORITHMES DE RESOLUTION POUR LES SYSTEMES ENERGETIQUES	226
ANNEXE B	ETUDE DE L'ALGORITHME LPFICS	229
a)	<i>Présentation de l'exemple d'application</i>	229
b)	<i>Comparaison de performances entre les algorithmes d'identification ComputeISS de Gurobi et LPFICS</i>	230
c)	<i>Identifier les contraintes négociables en premier</i>	231
ANNEXE C	CATEGORISATION DES ARTICLES SELON LA PRISE EN COMPTE DES ACTEURS DANS LES PROJETS ENERGETIQUES ...	233

ANNEXE D	REPRESENTATIONS GRAPHIQUES D'ASSEMBLAGES SOCIO-ENERGETIQUES.....	238
ANNEXE E	PROJET D'AUTOCONSOMMATION COLLECTIVE A SMARTMAGNE	240
	a) <i>Présentation du terrain</i>	240
	b) <i>Résultats de l'analyse qualitative pour le projet d'autoconsommation collective à SmartMagne</i>	240
	Autorités régulatrices extérieures au projet.....	241
	Autorités régulatrices locales.....	243
	Concepteur solution	243
	Consommateurs.....	243
	Développeurs.....	243
	Financeurs.....	244
	Gestionnaire réseau électricité	245
	Prosumers.....	245
	Riverains	246
	Stockeur	246
	Éléments naturels	247
	c) <i>Synthèse des contraintes et objectifs identifiés</i>	247
ANNEXE F	PROJET D'AUTOCONSOMMATION COLLECTIVE DES COLIBRES.....	248
	a) <i>Présentation du terrain</i>	248
	b) <i>Résultats de l'analyse qualitative pour le projet d'autoconsommation collective des Colibres</i> ...	248
	Architecte	249
	Autorités régulatrices extérieures au projet.....	249
	Autorités régulatrices locales.....	250
	Concepteur solution	250
	Consommateurs.....	251
	Développeurs.....	251
	Financeurs.....	251
	Fournisseurs.....	252
	Gestionnaire réseau d'électricité.....	252
	Prescripteurs.....	252
	Producteurs	252
	Propriétaires	253
	Prosumers.....	253
	c) <i>Synthèse des contraintes et objectifs identifiés</i>	254
ANNEXE G	PROJET DE VALORISATION DE CHALEUR AU VAL D'EUROPE	255
	a) <i>Présentation du terrain</i>	255
	b) <i>Résultats de l'analyse qualitative pour le projet de valorisation de chaleur au Val d'Europe</i>	255
	Aménageur	256
	Autorités régulatrices extérieures au projet.....	257
	Autorités régulatrices locales.....	258
	Chargé de maintenance	259
	Concepteur solution	260
	Consommateurs.....	260
	Développeur	261
	Financeurs.....	262
	Gestionnaire réseau de chaleur	262
	Producteurs	264
	c) <i>Synthèse des contraintes et objectifs identifiés</i>	265
ANNEXE H	EXEMPLE DE CONSENTEMENT ECLAIRE POUR LA RECUPERATION DE MATERIAUX (DONNEES ENERGETIQUES, ENTRETIENS, PHOTOS...) EN ACCORD AVEC LA RGPD	266
ANNEXE I	RECUPERATION DE CHALEUR DU LABORATOIRE DE CHAMPS MAGNETIQUES INTENSES : LE LNCMI	269
	a) <i>Présentation du cas d'étude</i>	269
	b) <i>Formulation du problème d'optimisation : approche méthodologique</i>	270

Modèle du LNCMI	270
Modèle de l'opérateur du réseau de chauffage urbain	271
Modélisation des autres objets énergétiques du modèles	272
Optimisation du problème Valocal	272
<i>c) Résultats & discussion</i>	<i>274</i>
Cohérence des résultats d'optimisation	274
Résultats et problématiques multiacteurs	274
<i>d) Conclusion et perspectives pour l'outil</i>	<i>276</i>
ANNEXE J PRODUCTION SCIENTIFIQUE.....	277
<i>a) Articles de conférence.....</i>	<i>277</i>
<i>b) Table ronde.....</i>	<i>278</i>
<i>c) Vidéo.....</i>	<i>278</i>
TABLE DES FIGURES.....	279
TABLE DES TABLEAUX.....	284
TABLE DES ENCADRES	285
TABLE DES MATIERES DETAILLEE	286
RESUME	293

Résumé

Les systèmes énergétiques bas-carbone sont développés pour limiter les émissions de gaz à effet de serre et lutter contre le changement climatique. Parmi les différents systèmes possibles, nous nous intéressons dans cette thèse aux systèmes énergétiques locaux bas-carbone (SELBC). Les SELBC sont des systèmes énergétiques de capture et d'échanges *in situ* d'énergie renouvelable intermittente ou de récupération. Analysant ces systèmes, généralement nouveaux, nous mettons en évidence deux distinctions majeures qui différencient les SELBC des systèmes énergétiques plus « classiques » : les SELBC font disparaître la distinction historique entre production et consommation, voire entre fourniture et consommation, et ils sont multiacteurs. Dans cette thèse nous nous proposons d'accompagner la conception des SELBC en phase de pré-étude. La conception des systèmes énergétiques s'appuie aujourd'hui largement sur des outils numériques d'aide à la conception. Nous considérons que les SELBC appellent une évolution de ces outils afin qu'ils deviennent supports de négociation et de synchronisation cognitive. La conception pourrait alors s'appuyer sur des métamodèleurs - outils proposant des briques de modèles préconstruites - d'optimisation qui soient open source, basés sur un langage orienté objet, avec une interface graphique. Dans ce cadre, nous avons développé une modélisation d'acteurs via leurs objectifs et contraintes. Cette modélisation est basée sur une démarche d'analyse qualitative d'acteurs impliqués dans des projets passés. Les développements proposés dans cette thèse ont été réalisés sur le métamodèleur OMEGAlpes. Les briques de modèles développées ont ensuite été appliquées à un projet d'autoconsommation électrique comparant un système d'autoconsommation collective et plusieurs systèmes d'autoconsommation individuelle.

Mots clefs : Systèmes énergétiques locaux bas-carbone, Assemblage socio-énergétique, Modèle multiacteur, Métamodèleur, Optimisation

Abstract

Low-carbon energy systems are developed to reduce greenhouse gas emissions and fight against climate change. In this dissertation, we focus on local low-carbon energy systems (LLCES). LLCES are energy systems catching *in-situ* intermittent renewable or recovery energy and exchanging it locally. Analyzing these systems, mainly new, we highlight two main differences compared to more "classic" energy systems: the fact that LLCES questions the historic distinction between energy production and consumption, and even energy supply and consumption, and the fact that they are multi-stakeholders. This dissertation aims to support LLCES design at pre-design stage based on numerical decision support tools. We consider that LLCES require transforming decision support tools as negotiation support tools and cognitive synchronization. Design could be thus based on optimization meta-modellers – tool proposing pre-designed bricks of models –, which could be open source, based on object oriented programming with a graphical interface. Based on a meta-modeller, we developed an actor model based on objectives and constraints, which are identified by a qualitative analysis of stakeholders involved in past projects. This work has been tested on the meta-modeller OMEGAlpes and applied on a collective self-consumption case study.

Key words: Local and low-carbon energy systems, Socio-energetic assemblage, Mutli-actor model, Meta-modeller, Optimization