

UNIVERSITÉ DE LILLE

École doctorale EG Ecole Gradué ENGYS-632

Unité de recherche L2EP EA2697

Thèse présentée par **Adrien Bossu**

Soutenue le **14 novembre 2024**

En vue de l'obtention du grade de docteur de l'Université de Lille

Discipline **Sciences pour l'ingénieur**

Spécialité **Génie électrique**

SOREL

**Supervision optimisée d'un réseau local de distribution
au sein d'une communauté énergétique : prise en
compte des critères électriques, environnementaux,
économiques et sociétaux**

Thèse dirigée par Christophe SAUDEMONT co-directeur
Fateh BELAÏD co-directeur
Benoît DURILLON co-encadrant
Arnaud DAVIGNY co-encadrant
Hervé BARRY co-encadrant

Composition du jury

<i>Rapporteurs</i>	François VALLÉE	Professeur d'université, EPEU
	Manuela SECHILARIU	Professeure d'université, AVENUES
<i>Examineurs</i>	Corinne ALONSO	Professeure d'université, LAAS
	Jean Luc THOMAS	Professeur du CNAM, CNAM, Président du jury
	Christophe SAUDEMONT	Professeur, L2EP
	Fateh BELAÏD	Professeur d'université, KAPSARC
	Benoît DURILLON	Enseignant-Chercheur, L2EP
	Arnaud DAVIGNY	Enseignant-Chercheur, L2EP
<i>Invités</i>	Benoît ROBYNS	Professeur, L2EP
	Hervé BARRY	Sociologue,FGES ICL

COLOPHON

Mémoire de thèse intitulé « SOREL », écrit par Adrien Bossu, achevé le 22 novembre 2024, composé au moyen du système de préparation de document $\text{\LaTeX}$ et de la classe yathesis dédiée aux thèses préparées en France.

Mots clés : energy management, energy community, interdisciplinarity, life cycle assessment

Keywords: gestion énergétique, communautés d'énergie, interdisciplinarité, analyse cycle de vie

Cette thèse a été préparée au

L2EP EA2697

Laboratoire d'électrotechnique et
d'électronique de puissance de Lille
Université des Sciences et Technologies de
Lille
59655 Villeneuve d'Ascq
France



☎ + 33 (0)3 20 43 42 35

📠 + 33 (0)3 20 43 69 67

✉ anouchka.loeuil@univ-lille.fr

Site <http://l2ep.univ-lille1.fr>

“L’utopie a changé de camp : est
aujourd’hui utopiste celui qui croit
que tout peut continuer comme
avant.”

SOREL**Supervision optimisée d'un réseau local de distribution au sein d'une communauté énergétique : prise en compte des critères électriques, environnementaux, économiques et sociétaux****Résumé**

Le secteur de l'énergie est en pleine mutation. Les défis environnementaux, les contextes économiques et géopolitiques exigent une profonde transformation de la relation de nos sociétés à l'énergie. L'électrification de certains usages et le déploiement d'énergies renouvelables représentent des solutions pour relever ces défis, mais entraînent également une modification de la gestion des réseaux électriques. Chaque consommateur est ainsi amené à devenir un acteur de la gestion énergétique et à être sollicité par les opérateurs de réseau.

Ce travail se positionne comme exploratoire en proposant une nouvelle méthodologie de gestion énergétique. Celle-ci est proposée dans le cadre de communautés d'énergie équipées de production photovoltaïque, où l'électricité est distribuée de manière coopérative. Les motivations et sensibilités des membres de ces communautés sont prises en compte grâce à des méthodologies issues des sciences humaines et sociales. Les jeux coopératifs issus de la théorie des jeux ont permis de modéliser les interactions humaines au sein d'une communauté d'énergie. Les limites de ces modèles mathématiques dans la gestion énergétique ont été identifiées. Des solutions, comme une méthode de sous-division des jeux pour réduire le temps de calcul, ont été proposées, rendant la théorie des jeux applicable à de plus grandes communautés. Une méthodologie de quantification des impacts environnementaux, basée sur la méthode d'analyse de cycle de vie (ACV), est également proposée et intégrée dans le système de gestion énergétique.

Le résultat de ces recherches est une méthodologie de distribution d'énergie renouvelable dans laquelle les acteurs coopèrent pour augmenter leur satisfaction et améliorer l'efficacité du système d'énergie renouvelable. L'application et la comparaison de concepts de répartition des gains issus de la théorie des jeux a permis de soulever des questions éthiques et organisationnelles. Par ailleurs, la méthodologie de quantification des impacts environnementaux a contribué à mieux intégrer les enjeux environnementaux dans les travaux de gestion des réseaux électriques. Cette thèse est donc construite autour d'une interdisciplinarité entre les sciences de l'ingénieur et les sciences humaines et sociales. Elle propose une méthodologie qui répond à la fois aux problématiques techniques de la gestion de l'énergie, aux enjeux environnementaux et aux problématiques sociales.

Mots clés : energy management, energy community, interdisciplinarity, life cycle assessment

Abstract

The energy sector is undergoing significant changes. Environmental challenges, economic and geopolitical contexts, oblige us to reconsider the relationship between energy and our societies. Electrifying uses and deploying renewable energy sources are solutions to address these issues. They also lead to changes in the management of electrical grids. Each consumer will be asked to become an active participant in energy management and can be requested by grid operators.

This work is exploratory, proposing a new methodology for energy management. It is designed for energy communities equipped with photovoltaic production. Electricity is cooperatively managed by its stakeholders. The motivations and sensitivities of the community members are considered through methodologies derived from the social sciences and humanities. Game theory, and cooperative games in particular, has been applied to model consumer behavior, facilitating cooperation among participants. The limits of these mathematical models in their application to energy management have been studied. Solutions to these limitations have also been proposed. In particular, a method of subdividing the game to reduce computation time is presented, enabling game theory to be applied to larger communities. Additionally, an environmental impact assessment methodology, based on the Life Cycle Assessment approach, is proposed and integrated into the energy management system.

The results of this research are a methodology for distributing renewable energy in which participants collaborate to increase their satisfaction and enhance the efficiency of the renewable energy system. The application and comparison of gain distribution concepts from game theory have raised ethical and organizational questions. Furthermore, the environmental impact assessment methodology has allowed for better consideration of environmental issues in the management of electrical grids. This thesis is built on an interdisciplinary approach, combining engineering sciences with the social sciences and humanities. The proposed methodology addresses the technical challenges of energy management, and the environmental and social issues.

Keywords: gestion énergétique, communautés d'énergie, interdisciplinarité, analyse cycle de vie

Remerciements

Une thèse est une aventure qui permet de percevoir la relativité du temps et de l'espace. Tout se passe à la fois vite et lentement et souvent en solitaire. Au moment d'écrire les remerciements, on se rend compte que la solitude n'est qu'un ressenti et que les 3 ans se sont déroulés aux côtés de nombreuses personnes qui ont chacune contribué au bon déroulement de ce travail.

Tout d'abord, je souhaite remercier l'ensemble de mon encadrement de m'avoir laissé explorer ce sujet vaste et intéressant. Merci pour les échanges en réunion et en dehors qui ont permis de prendre des décisions. Les réunions ont bien souvent duré plus longtemps que prévu à cause de mes nombreuses questions. Christophe, Arnaud, Hervé, je vous transmets toute ma gratitude pour ces discussions. Un remerciement particulier également à Benoît Robyns qui a permis à ce sujet d'exister et qui a toujours suivi avec assiduité ce travail. Il n'aurait pas trouvé de sens sans la démarche globale initiée par l'Université Catholique de Lille et le L2EP.

Merci aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse, pour l'intérêt porté à ce sujet et pour l'ensemble des remarques constructives qui démontrent que la thématique reste largement à explorer pour répondre à l'ensemble des problématiques identifiées. Merci à Jean-Luc Thomas, professeur du CNAM, d'avoir accepté de présider le jury ; Merci à François Vallée, professeur à l'université de Mons et à Manuella Sechilariu, professeure d'université à l'UTC et à Corinne Alonso, professeure d'université à l'université de Toulouse Paul Sabatier pour l'ensemble des questions et l'intérêt porté à mes travaux lors de ma soutenance.

Merci également à l'ensemble de l'équipe EEA, et notamment à son responsable Patrick Debay, qui m'a donné leur confiance pour mener des travaux pédagogiques pendant la totalité de ma thèse. Ces expériences d'enseignement ont été très enrichissantes.

Une petite (grande) pensée pour l'ensemble des collègues qui ont accompagné mon aventure au 29 boulevard Vauban. Merci à Anthony, qui m'a initié à la programmation Python. Merci à Willy pour sa bonne humeur quotidienne, sa philosophie et les longues discussions musicales. Bien sûr, un grand merci à

mes partenaires de thèses, Mhamad et Amira, pour leurs débats quotidiens et pour les moments passés ensemble en conférence à Rome ; Benoit pour toutes les discussions intéressantes pour refaire le monde ensemble les midis.

Parce qu'une thèse, c'est également une aventure personnelle, je souhaite maintenant remercier chaleureusement mes proches et amis pour m'avoir soutenu pendant ces trois ans. Merci à ma famille qui m'a transmis tout ce qu'elle pouvait pour la réussite de l'ensemble de mon parcours universitaire. Ma petite sœur, Héloïse, qui a finalement compris au bout de deux ans que mon travail n'était pas une thèse sur les énergies renouvelables, je te remercie pour ton soutien inconditionnel et pour tous les merveilleux moments passés ensemble à trois avec Loulou. Un très grand Merci à vous deux.

Je n'aurai sans doute pas fini ce travail sans mes nombreux amis. Une pensée particulière pour les plus anciens amis qui ont toujours été présents et m'ont toujours soutenu dans les moments les plus difficiles. Thomas, Antoine, Fred merci d'avoir toujours été à l'écoute pendant ces 3 ans et pour tous ces moments ensemble malgré la distance.

Des fois, il est nécessaire d'avoir des échanges profonds sur la vie pour avancer dans un travail comme celui-ci. Bien sûr, ce grand merci revient à mes petites pastèques préférées. Merci Johanne et Grégoire pour toutes ces discussions pendant les pauses du midi. Votre amitié est un véritable pilier dans ma vie.

Il faut également savoir se rafraîchir les idées, et pour cela, rien de mieux que des longues randonnées. Merci à ce petit groupe de randonneurs. Parmi ceux que je n'ai pas encore énoncés : Le grand docteur Jad pour sa volonté de fer, Orlane pour m'avoir initié au crossfit et Max pour les tracés spectaculaires.

Une thèse, c'est également de belles rencontres. Notamment lors de dégustations de bière pour la science. Merci à Mathilde, Makram, Bianca, Cintia et Christophe pour toutes ces soirées et week-ends.

Un merci particulier à ma petite sœur d'adoption de thèse, Ines. Merci pour tous les partages d'expériences de vie et de vie de doctorant. Merci d'avoir été présente dans les moments les plus compliqués de ce travail et de m'avoir aidé pendant les petits tracas de genoux.

Merci également à Vincent et Valentine qui ont accepté de m'adopter dans leur cercle de musiciens et qui m'ont ouvert des perspectives pour la suite. Merci pour tous ces enseignements aussi bien musicaux que de vie.

Je ne pourrai pas finir ces remerciements sans penser à Camille qui m'a encouragé à me lancer dans cette aventure et pour tous ses partages de playlists Spotify qui ont accompagné mes journées.

Bien sûr, il y a un grand absent à tous ces remerciements. Enfin, pas totalement, car il est suggéré dans l'ensemble des paragraphes qui composent ces remerciements. Il mérite donc une place particulière et il est coutume de garder

le meilleur pour la fin. Alors un immense merci à Benoit Durillon, qui encadrerait ce travail, mais qui est surtout l'un de mes plus proches amis. Ces dernières années et ce travail auraient tellement été différents sans sa présence. Je lui laisse donc ce message : Les mots ne suffiront pas à exprimer tout ce que tu as pu m'apporter depuis que nous nous connaissons. J'ai énormément appris à tes côtés, que ce soit personnellement ou professionnellement. Tu as toujours été disponible pour me débloquer de situations inextricables. Je suis reconnaissant pour tous ces moments passés ensemble, pour ta bonne humeur et ton soutien inconditionnel. Ces trois ans auraient été beaucoup plus compliqués sans ta présence. Alors pour tout ça, MERCI!

Acronymes

A | B | C | D | E | G | H | I | P | R | S | T | V

A

ACC Autoconsommation collective. 18, 19

ACV Analyse sur Cycle de Vie. 50, 52, 56, 57, 76, 79, 81, 101, 175, 179, 184

ADEME Agence de la transition écologique. 22, 50

B

BEC Ballon d'Eau Chaude. 66, 111

C

CE Communauté d'énergie. 21

CO_{2eq} CO₂ équivalent. 50

D

DSM Management par la demande (Demand Side Management). 25, 27, 28, 30, 32, 48

E

EDF Électricité de France. 16

ENR Énergies Renouvelables. 10, 15, 20, 31, 38, 52, 55, 57, 58, 73, 156

G

GES Gaz à effet de serre. xxiii, 9–11, 13–15, 49, 50, 56, 57

GRD Gestionnaire du Réseau de Distribution. 23, 27, 35, 44, 107, 181

H

HEMS Home Energy Management Systems. 37, 57

I

IOT Internet of things (Internet des objets). 28

P

PAR Peak-to-Average Ratio. 27, 28, 107, 109, 111, 112, 114, 116, 119, 121, 123

PV Photovoltaïque. 32, 71, 101, 104, 119, 124

R

RTE Réseau de transport d'électricité. 15, 49

S

SED Squared Euclidean Distance. 28, 107, 109, 111, 112, 114, 116, 119, 121, 123

SHS Sciences Humaines et Sociales. xxiii, 24, 26, 36, 40, 41, 58, 59, 64, 73, 176, 181

SI Sciences de l'Ingénieur. 21, 24, 35, 44, 58, 59, 64, 73, 181

SV Valeur de Shapley. xxiv, 135, 137, 139, 140, 145, 148, 151, 152, 166

T

TIC Technologies de l'Information et de Communication. 28, 32, 58, 89

V

VE Véhicule Électrique. 52, 55, 66, 69, 93, 111, 116, 121, 135, 137

Symboles

A (Taux d'autoconsommation de la communauté)	73, 100, 114, 116, 119, 121
a (Indice de référence des appareils)	93
A^i (Taux d'autoconsommation du foyer i)	99
A_{optcol} (Taux d'autoconsommation de la communauté après optimisation collective)	xxiii, 100, 106, 107
A_{optind} (Taux d'autoconsommation de la communauté après optimisations individuelles)	xxiii, 100, 106, 107
C_{auto} (Coût associé aux consommations d'électricité de la communauté fournie par le moyen local de production)	75, 76, 109
C_{grid} (Coût associé aux consommation d'électricité de la communauté fournies par le réseau de distribution)	75, 76
C_{inj} (Coût de valorisation de l'électricité produite localement injectée sur le réseau de distribution)	75, 76, 109
C_{optcol} (Coûts associés à l'ensemble des consommation d'électricité de la communauté après optimisation collective)	100
C_{optind} (Coûts associés à l'ensemble des consommation d'électricité de la communauté après optimisations individuelles)	100
C_{Spot} (Prix de l'énergie sur le marché Spot)	76
$C_{optcol}(S)$ (Coût associé aux consommations d'électricité de la coalition S après optimisation collective)	135, 151, 152
C_{optind}^i (Coût associé aux consommations d'électricité du foyer i après optimisation individuelle)	135, 151, 152, 156
C_{tot} (Coût associé à l'ensemble des consommations d'électricité de la communauté)	76, 108, 114, 116, 119, 121

C_{tot}^i (Coût associé aux consommations d'électricité du foyer i)	99
C_{TURPE} (Coût associé à l'utilisation du réseau de distribution)	76
d (Vecteur des parts de gains ou pertes accordés aux logements avec attribution de score)	142
Δ_{Score}^i (Score totale attribuée au logement i)	142
ID_{cycl}^i (Ensemble des appareils cycles du foyer i)	93
ID_{fix}^i (Ensemble des appareils fixes du foyer i)	93
ID_{oo}^i (Ensemble des appareils TOR du foyer i)	93
e_{auto} (Part d'énergie consommée provenant du moyen de production local)	73, 76, 88
E_{BT} (Energie livrée sur le réseau BT)	82
E_{eff} (Vecteur composé des consommations d'énergies par personne disponibles dans la communauté)	142
$\hat{e}_{a,t}^i$ (Consommation de l'appareil a du foyer i au pas de temps t avant toute optimisation)	93
E_{flex} (Vecteur composé des énergies flexibles par personne disponibles dans la communauté)	142
e_{grid} (Part d'énergie consommée provenant du réseau de distribution)	76, 88
E_{HT} (Energie en sortie de centrale connectée au réseau HT)	82
$e_{a,t}^i$ (Consommation de l'appareil a du foyer i au pas de temps t)	93
E_{eff}^i (Consommation d'énergie par personne du foyer i)	142
$E_{flex_{tot}}^i$ (Energie flexible totale disponible du foyer i)	135, 136, 142
e_{inj} (Part d'énergie produite non consommée injectée sur le réseau de distribution)	76, 88
e_{prod} (Énergie produite par le moyen de production local)	73
ε_{eff}^i (Performance en matière de consommation par personne du logement i)	142
ε_{flex}^i (Performance en matière de flexibilité par personne du logement i)	142
$E_{PV_{tot}}$ (Énergie photovoltaïque totale produite sur la durée de de vie de la centrale)	76
θ (Excès du vecteur de gain x pour la coalition S)	132
f (Fonction objectif l'optimisation collective)	100

f^i (Fonction objectif de l'optimisation individuelle du foyer i)	99
$\mathcal{G}_{cost}$ (Gains financiers totaux)	152, 153, 162
$\mathcal{G}_{env}$ (Gains environnementaux totaux)	152, 153, 162
i (Indice des foyers)	xv–xviii, 131, 135, 142
k (Indice des cluster)	161
L (Vecteur de taille T contenant les charges totales sur le réseau)	28
$\mathcal{N}$ (Set comprenant les joueurs du jeu collaboratif)	130, 131, 141
n (Nombre de joueurs)	130, 141, 142
O_i (Part de gains attribuée au joueur i par Nucleolus)	167, 169, 171
O_g^i (Part de gains attribuée au joueur i après clustering par Nucleolus)	167, 169, 171
O_k^i (Part de gains attribuée au joueur i dans la grappe k par Nucleolus)	167, 169, 171
O_k (Part de gains attribuée à la grappe k par Nucleolus)	167, 169, 171
p (Nombre de particule générée par l'algorithme d'optimisation)	97
P_a (Puissance nominale de l'appareil a)	93
P_c^{opt} (Puissance crête optimale de la centrale photovoltaïque)	105, 106
r (Pondérations dans le calcul de la fonction caractéristique)	153
ρ^i (Sensibilité du foyer i $\rho^i = (\rho_{price}^i, \rho_{auto}^i, \rho_{env}^i)$)	xvii, 105, 107, 113, 115, 116
ρ_{auto}^i (Sensibilité du foyer i sur l'autonomie)	xvii, 99
ρ_{env}^i (Sensibilité du foyer i sur l'environnement)	xvii, 99
ρ_{price}^i (Sensibilité du foyer i sur le prix)	xvii, 99
$\mathcal{S}$ (Coalition de joueur)	130–132, 135, 151, 152
φ_i (Valeur de Shapley attribuée au joueur i)	131, 143, 153, 167, 169, 171
φ_i^* (Valeur de Shapley modifiée)	142, 143
φ_{cost}^i (Distribution de gains financiers par valeur de Shapley)	153, 162
φ_{env}^i (Distribution de gains environnementaux par valeur de Shapley)	153, 162
φ_g^i (Valeur de Shapley attribuée au joueur i après clustering)	167, 169, 171
φ_k^i (Valeur de Shapley attribuée au joueur i dans la grappe k)	161, 162, 167, 169, 171
φ_k (Valeur de Shapley attribuée à la grappe k)	161, 162, 167, 169, 171
S_k (Coalitions de grappes de joueurs)	161

T (Nombre de pas de temps)	xvii, 93
t (Indice de pas de temps)	88, 93
T_a (Durée de fonctionnement de l'appareil a)	93
t_a^e (Heure de fin d'utilisation de l'appareil a)	93
t_a^{max} (Heure de fin maximale autorisée pour l'appareil a)	93
t_a^{min} (Heure de départ minimale autorisée pour l'appareil a)	93
t_a^s (Heure de départ d'utilisation de l'appareil a)	93
τ_{auto} (Impact environnemental des consommations d'électricité de la communauté fournies par le moyen local de production)	88
τ_{grid} (Impact environnemental des consommations d'électricité de la communauté fournies par le réseau de distribution)	88
τ_{inj} (Impact environnemental de l'électricité produite localement injectée sur le réseau de distribution)	88
τ_{optcol} (Impacts environnementaux associés à l'ensemble des consommations d'électricité de la communauté après optimisation collective)	100, 152
τ_{optind} (Impacts environnementaux associés à l'ensemble des consommations d'électricité de la communauté après optimisations individuelles)	100, 152
τ_{tot} (Impact environnemental de l'ensemble des consommations d'électricité de la communauté)	88, 108, 114, 116, 119, 121
τ_{tot}^i (Impact environnemental des consommations d'électricité du foyer i)	99
$\mathcal{V}$ (Fonction caractéristique du jeu coopératif)	130
$V_{env}(S)$ (Composante autonome de la fonction caractéristique)	152
$V_{cost}(S)$ (Composante prix de la fonction caractéristique)	152
$V_{env}(S)$ (Composante environnementale de la fonction caractéristique)	152
$\mathcal{V}(\mathcal{S})$ (Fonction caractéristique attribuée à la coalition S)	xxii, 131, 132, 135, 141, 151–153, 156, 161
w_{eff} (Poids accordé à la consommation d'énergie par personne pour élaborer le score attribué aux logements)	142, 143, 150
w_{flex} (Poids accordé au potentiel de flexibilité par personne pour élaborer le score attribué aux logements)	142, 143, 150
x (Vecteur de gain)	129, 131, 132

Sommaire

Résumé	ix
Acronymes	xi
Symboles	xiii
Sommaire	xvii
Liste des tableaux	xix
Table des figures	xxi
Introduction générale	1
I Cadre des travaux de recherches	5
1 Contexte	7
2 Positionnement du sujet	25
II Travaux réalisés	61
3 Méthode d'optimisation et intérêts collectifs	63
4 Distribution des gains dans la communauté	127
5 Conclusion et perspectives	175
Bibliographie	187
A Annexe A	217

B Annexe B**219**

Liste des tableaux

3.1	Répartition des moyens de chauffage des foyers	67
3.2	Taux de pénétration des équipements dans les foyers	67
3.3	Répartition du nombre d'occupants par foyer	67
3.4	Appareils considérés dans le modèle CREST et leur puissance nominale	68
3.5	Paramètres des véhicules électriques considérés	70
3.6	Distance moyenne journalière parcourue considérée	70
3.7	Puissances de recharge considérées	70
3.8	Caractéristiques du système Photovoltaïque	72
3.9	Pondérations des impacts environnementaux dans le score unique	80
3.10	Source utilisée pour l'étude ACV de l'énergie délivrée en milieu résidentiel	85
3.10	Source utilisée pour l'étude ACV de l'énergie délivrée en milieu résidentiel	86
3.10	Source utilisée pour l'étude ACV de l'énergie délivrée en milieu résidentiel	87
3.11	Score ACV attribué à chaque source d'énergie par analyse ACV	88
3.12	Données de l'Etude ACV matériel de flexibilité	90
3.13	Impacts environnementaux des appareils de flexibilité	91
3.14	Score ACV annuel des trois états étudiés	102
3.15	Gains obtenus grâce à l'optimisation collective par rapport aux optimisations individuelles	112
3.16	Indicateurs observés après optimisations individuelles et collective	114
3.17	Indicateurs observés après optimisations individuelles et collective (Scénario 2)	116
3.18	Indicateurs observés après optimisations individuelles et collective (Scénario 3)	119
3.19	Répartition des profils dans la communauté	121
3.20	Indicateurs observés après optimisations individuelles et collective (Scénario 4)	121

3.21	Résumé des gains obtenus par l'optimisation collective sur les optimisations individuelles selon les scénarios	123
4.1	Flexibilité disponible des foyers	136
4.2	Heures de présence dans les foyers possédant un VE	136
4.3	Part des gains attribués à chaque foyer	136
4.4	Résumés des distributions par valeur de Shapley modifiée . . .	150
4.5	Résumés des distributions par Nucleolus modifié	150
4.6	Part des gains attribués à chaque foyer en fonction de la pondération de $\mathcal{V}(\mathcal{S})$ en considérant une récompense sur le prix ($r=(1,0,0)$) et une récompense prenant en compte les sensibilités ($r=(1/3,1/3,1/3)$)	156
4.7	Exemples de gestion de l'énergie basée sur des jeux collaboratifs	158
4.8	Composition des grappes en fonction des scénarios	163
4.9	Valeurs de la fonction caractéristique du jeu 1 (scénario 1) . . .	166
4.10	Distribution de gains après méthode de Clustering (Scénario 1)	167
4.11	Distribution de gains après méthode de Clustering (Scénario 2)	169
4.12	Distribution de gains après méthode de Clustering (Scénario 3)	171
B.4	Impacts environnementaux de l'énergie provenant du réseau calculés grâce la base de données Ecoinvent	223

Table des figures

1.1	Projections des émissions de GES par scénarios et leurs impacts sur le réchauffement global [1]	11
1.2	Fréquence des événements climatiques extrêmes en fonction du réchauffement climatique global[1]	12
1.3	Répartition des consommations d'énergie finale - France-2020 [7]	13
1.4	Consommation d'énergie finale par continent [10]	14
1.5	Evolution des réseaux électriques	17
2.1	Résumé des outils de management énergétique	30
2.2	Scénarios d'évolution des consommations énergétiques du numérique [68]	34
2.3	Scope des différentes disciplines SHS	41
2.4	Schémas des modèles économiques discutés	45
3.1	Origine des données énergétiques de la communauté	72
3.2	Modélisation des pertes prises en compte dans l'ACV	84
3.3	Méthodologie et processus d'optimisation	92
3.4	Exemple de flexibilité par type d'appareils (Cycle (a), TOR (b), VE (c))	95
3.5	Influence des paramètres de l'algorithme d'optimisation	97
3.6	Exemple d'évolution de l'algorithme d'optimisation par essaim particulière	98
3.7	Evolution du nuage de particules avec un paramétrage à convergence rapide (a) et exploratoire (b)	99
3.8	Origine des consommations électriques de la communauté avant (a) et après optimisation collective (b) (jour d'hiver)	104
3.9	Évolution des taux d'autoconsommations de la communauté après optimisation individuelles et collective en fonction des différentes puissances crêtes de la centre photovoltaïque	106
3.10	Différence des taux d'autoconsommation de la communauté après optimisations individuelles et collective ($A_{optcol} - A_{optind}$)	107

3.11	Origine des consommations électriques de la communauté après optimisation individuelle (a) et collective (b) (jour d'irradiation minimale)	108
3.12	Origine des consommations électriques de la communauté après optimisation individuelle (a) et collective (b) (jour d'irradiation maximale)	110
3.13	Consommations couvertes par le réseau avant toute optimisation (a) et après optimisation collective (b)	110
3.14	Origine des consommations électriques de la communauté après optimisation individuelle (a) et collective (b) avec production moyenne	111
3.15	Prix de l'énergie sur la journée étudiée (C_{grid} , C_{auto})	115
3.16	Origine des consommations électriques de la communauté après optimisation individuelle sur le prix (a) et collective (b)	117
3.17	Evolution de l'impact environnemental de l'énergie circulant sur le réseau sur une journée	118
3.18	Origine des consommations électriques de la communauté après optimisations individuelles sur l'impact environnemental (a) et collective (b)	119
3.19	Origine des consommations électriques de la communauté après optimisations individuelles avec répartition homogène des profils (a) et collective (b)	122
4.1	Méthode pour générer le Nucleolus	134
4.2	Factures d'électricité des foyers avant et après optimisation	136
4.3	Répartition des gains dans la communauté par valeur de Shapley	137
4.4	Répartition des gains dans la communauté par Nucleolus	138
4.5	Factures d'électricité des foyers après distribution par SV et Nucleolus	140
4.6	Répartition des consommations (a) et des consommations par personnes (b) dans la communauté	144
4.7	Répartition des flexibilités (a) et des flexibilités par personnes (b) dans la communauté	144
4.8	Répartition de gains par Valeurs de Shapley modifiée (a) et Nucleolus modifié (b) par potentiel de flexibilité par personne	146
4.9	Répartition de gains par Valeurs de Shapley modifiée (a) et Nucleolus modifié (b) par consommations par personne	147
4.10	Répartition de gains par Valeurs de Shapley modifiée (a) et Nucleolus modifié (b) en considérant effort de flexibilité et de consommation d'énergie	148

4.11 Distribution par valeur de Shapley pour $r=(1,0,0)$ et $r=(1/3,1/3,1/3)$	154
4.12 Distribution par Nucleolus pour $r=(1,0,0)$ et $r=(1/3,1/3,1/3)$.	155
4.13 Méthodologie et processus d'optimisation avec méthode de réduction du temps de calcul	161
4.14 Distribution de gains avec méthode de clustering	162
4.15 Répartition de gains par Valeurs de Shapley (a) et Nucleolus (b) après regroupement par profil	165
4.16 Répartition de gains par Valeurs de Shapley (a) et Nucleolus (b) après regroupement par flexibilités disponibles	168
4.17 Répartition de gains par Valeurs de Shapley (a) et Nucleolus (b) après regroupement par consommations d'énergie	170

Introduction générale

La lutte contre le réchauffement climatique est actuellement l'un des plus gros défis à relever pour nos sociétés. L'énergie, vecteur des activités humaines et une des principales sources d'émissions de gaz à effet de serre, est logiquement au cœur des débats actuels. La solution est simple aux premiers abords : il est nécessaire de consommer moins d'énergie et la couverture des besoins doit se faire par des moyens de production faiblement émetteurs de gaz à effet de serre.

Le développement de moyens de production d'énergie renouvelable accompagné de programmes de gestion énergétique est la solution la plus étudiée à l'échelle internationale. Les énergies renouvelables sont en effet peu émettrices de gaz à effet de serre, et de larges campagnes de sensibilisation autour de l'énergie permettent de diminuer les consommations énergétiques globales. Le principal inconvénient de ces solutions réside dans l'intermittence de la production énergétique renouvelable. Dépendantes aux aléas météorologiques, ces sources d'énergies nécessitent des adaptations dans la gestion des réseaux électriques. Historiquement, la production énergétique permettait de maintenir l'équilibre des réseaux électriques. L'intermittence des énergies renouvelables impose un changement de paradigme où l'équilibre du réseau passe désormais aussi pas une régulation croissante de la consommation. Le consommateur d'énergie devient progressivement un acteur important pour garantir la continuité de l'approvisionnement électrique. Il doit adapter ses habitudes énergétiques et participer activement à la gestion des réseaux.

Pour répondre technologiquement à ces problématiques, des réseaux intelligents (smart grids) sont déployés. Ces solutions consistent notamment à mesurer les consommations énergétiques, à remonter les informations aux utilisateurs du réseau pour qu'ils soient en mesure d'adapter leurs consommations. Ces adapta-

tions peuvent être la recherche de gaspillage d'énergies, d'investissements dans des systèmes plus performants ou de réduction volontaire des consommations énergétiques. Ces travaux se concentrent sur un dernier aspect de ces adaptations : le décalage des consommations, appelé "flexibilité". Les smart grids traitent ce sujet par l'automatisation de l'activation d'appareils pour optimiser leur utilisation en fonction des besoins du réseau.

Les principaux défauts de ces solutions sont :

- La difficulté à mobiliser les consommateurs. La plupart des solutions présentent des systèmes efficaces techniquement, mais se heurtent au désintérêt et à l'incompréhension des utilisateurs. Cela est notamment dû à la non prise en compte du facteur humain dans les gestions énergétiques.
- Le retour chiffré du bénéfice environnemental des Smart Grid. Ces solutions technologiques permettent de répondre en partie aux problématiques énergétiques, mais l'objectif initial de réduction de l'impact environnemental est rarement abordé de manière adéquate. Le manque de méthodologie dans ce domaine explique cette limitation.

Ces travaux de thèse ont pour objectif d'apporter des éléments de réponses à ces deux problématiques. Le laboratoire L2EP a décidé de dédier une partie de ses travaux de recherche à des activités interdisciplinaires dont font partie ces travaux de thèse. Un modèle reposant sur une nouvelle forme de gestion énergétique collaborative va être développé. Cette solution permet de développer une supervision dans laquelle les usages et les motivations des consommateurs sont modélisés dans une logique de coopération.

Concernant les impacts environnementaux, une méthodologie sera présentée pour estimer précisément les impacts environnementaux liés à une communauté d'énergie. Cette méthodologie chiffre les impacts environnementaux au-delà des effets sur le réchauffement climatique.

Ce travail est composé de cinq chapitres. Les deux chapitres composant la première partie de ce mémoire seront dédiés au contexte et à la revue de littérature effectuée sur les différentes disciplines explorées. Les travaux effectués seront présentés dans la deuxième partie de ce document. Un premier chapitre est dédié à présenter l'ensemble des hypothèses retenues et les avantages de la

solution proposée d'un point de vue collectif. Le chapitre suivant est dédié à la répartition des gains générés collectivement au sein de la communauté. Le dernier chapitre présente les limites des recherches et l'ensemble des pistes identifiées qui n'ont pas pu être explorées pendant la thèse.

Première partie

Cadre des travaux de recherches

Chapitre 1

Contexte

Sommaire du présent chapitre

Introduction	8
1.1 Contexte environnemental	8
1.1.1 Historique de la question environnementale	8
1.1.2 Les enjeux environnementaux	10
1.2 Contexte énergétique	10
1.2.1 Quelle utilisation de l'énergie en France et dans le monde?	10
1.2.2 Les engagements pour limiter le réchauffement climatique	14
1.2.3 L'évolution des réseaux électriques	16
1.3 Autoconsommation et communauté d'énergie	18
1.3.1 Autoconsommation individuelle et collective	18
1.3.2 Les Communautés d'énergie : Définitions	20
1.4 Expérimentations existantes	21
1.4.1 Position des laboratoires de recherche Français	21
1.4.2 Exemples d'expérimentations en France	22
1.4.3 Position du sujet de recherche à l'étranger	23
1.5 Conclusion et objectifs du sujet	23

Introduction

La problématique de l'énergie est vaste. D'un côté source de développement économique, la croissance de son utilisation a déséquilibré le rapport de nos sociétés à son environnement. Le travail de recherche présenté dans ce document s'intéresse à différentes notions autour de l'énergie. Premièrement, comme un grand nombre de travaux de recherche portant sur la gestion énergétique, le principal moteur de la recherche se base sur une réduction de l'impact environnemental des réseaux énergétiques. Le domaine des réseaux électriques va avoir un rôle majeur à jouer dans cette transition nécessaire. Nous verrons dans ce présent chapitre, les contextes environnementaux et les problématiques qu'ils soulèvent. Nous discuterons ensuite de l'évolution des réseaux électriques pour répondre à ce changement de paradigme et nous finirons par discuter des nouveaux cadres légaux qui réorganisent aujourd'hui la gestion de l'électricité en France, en Europe et dans le monde.

1.1 Le contexte environnemental, moteur des travaux de recherche sur la transition énergétique

Les questions environnementales et climatiques sont aujourd'hui au cœur de l'évolution de nos modèles de sociétés. Les experts du GIEC exposent dans leurs rapports l'évolution du climat [1], les conséquences du changement climatique [2] et les solutions envisageables pour s'y adapter [3]. Un bref historique des événements internationaux majeurs sera fait dans un premier temps et une présentation globale des enjeux environnementaux sera faite dans ce paragraphe.

1.1.1 Historique de la question environnementale

Depuis la révolution industrielle du XIXe siècle, la mécanisation a provoqué d'importants bouleversements économiques, avec une pression croissante sur

l'environnement, notamment due à l'utilisation des énergies fossiles, principales sources des émissions de GES. Le changement climatique est aujourd'hui l'impact le plus médiatisé, mais il n'est pas le seul enjeu environnemental à surmonter.

La communauté scientifique se penche depuis plusieurs décennies sur les questions environnementales. En 1949, la Conférence scientifique de l'ONU sur la conservation et l'utilisation des ressources fut la première initiative de l'ONU visant à aborder la problématique de l'appauvrissement des ressources naturelles et à examiner leur utilisation [4]. Le premier sommet "Planète Terre" a eu lieu en 1972 à Stockholm, résultant du premier accord international avec comme principe fondamental le droit de l'Homme à vivre dans un environnement de qualité. D'autres initiatives telles que le protocole de Montréal en 1987 ont cherché à éliminer les substances appauvrissant la couche d'ozone. L'année 1990 est marquée par le premier rapport du GIEC qui aboutira au sommet de la Terre à Rio en 1992. En 1997, le protocole de Kyoto est signé, premier accord engageant les pays signataires à réduire leurs émissions de GES.

Il faudra ensuite attendre 2015, et les accords de Paris pour mettre à jour les accords internationaux en matière de climat. L'accord vise à limiter le réchauffement climatique bien en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels, avec l'ambition de le maintenir à 1,5°C. En 2023, le GIEC publie son sixième rapport, dans lequel il estime que le dépassement des 1.5°C pourrait être atteint dès le début des années 2030 . Il fait état d'une augmentation des émissions de gaz à effet de serre malgré les différents accords ratifiés et estime que limiter le réchauffement planétaire en dessous de 2°C ne sera possible qu'en accélérant et en approfondissant dès maintenant la baisse des émissions [5].

Après 6 rapports du GIEC et une dizaine de conventions sur l'environnement, le constat est que la plupart des objectifs qui avaient été fixés en termes d'environnement n'ont pas été respectés et les conséquences de ces inactions vont affecter de plus en plus négativement la stabilité des systèmes environnementaux et, par conséquent, les sociétés humaines. Cependant, des réussites, comme les accords de Montréal, montrent qu'une réelle coopération internationale ciblée peut permettre le respect d'engagements environnementaux.

1.1.2 Les enjeux environnementaux

Pour répondre aux enjeux environnementaux, la recherche scientifique, synthétisée par le GIEC, se base sur des scénarios probabilistes d'émissions de gaz à effet de serre et donc de réchauffement global planétaire. Ces scénarios sont élaborés grâce à un ensemble d'hypothèses socio-économiques (Population, Éducation, Urbanisation, PIB) et sont dénommés SSP (Shared Socio-economic Pathways). Les figures 1.1 et 1.2 issues des rapports du GIEC [1] permettent de rappeler les tendances envisagées et ce que chaque scénario inclut comme risque sur les sociétés humaines. À noter qu'un niveau de réchauffement peut être atteint par plusieurs trajectoires, c'est pour cela que les scénarios de +4°C à la fin du siècle sont souvent pris en référence dans un contexte d'adaptation climatique : si les sociétés arrivent à s'adapter à un scénario de +4°C, alors elles s'adapteront à tous les scénarios entre 1.5°C et 4°C. De plus, les scénarios SSP1-1.9 et SSP1-2.6 permettant de respecter les accords de Paris sont très ambitieux, car ils prévoient une baisse rapide des émissions de GES dès 2020 et semblent de moins en moins atteignables.

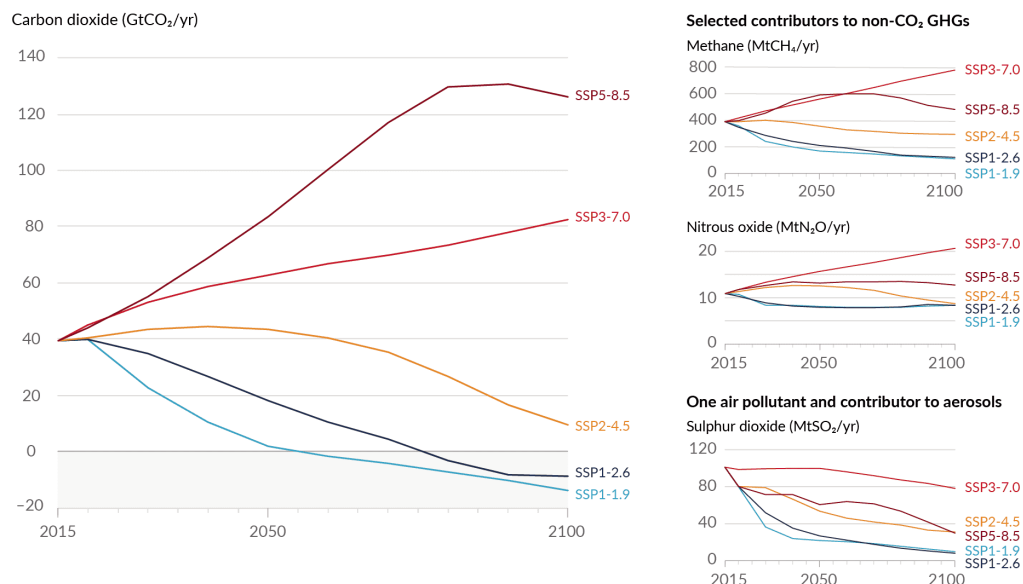
1.2 Le contexte énergétique et le rôle futur des réseaux électriques

1.2.1 Quelle utilisation de l'énergie en France et dans le monde ?

L'énergie est un flux structurant nos organisations sociales. La question d'accès aux infrastructures énergétiques est un enjeu crucial dans le monde actuel. Source de conflits, vecteur de progrès, l'énergie est au cœur des relations internationales et peut avoir un impact économique direct sur notre quotidien, en témoignent les hausses des prix de l'énergie en Europe depuis 2021 [6]. Le débat tourne très souvent autour de la production d'électricité : faut-il plus de nucléaire, plus d'Énergies Renouvelables (ENR), moins de charbon... ? Il est important de rappeler que le secteur de l'électricité ne représente qu'environ 50% de l'énergie finale consommée en France. La Figure 1.3 donne les répartitions des consommations d'énergie finale en France en 2020.

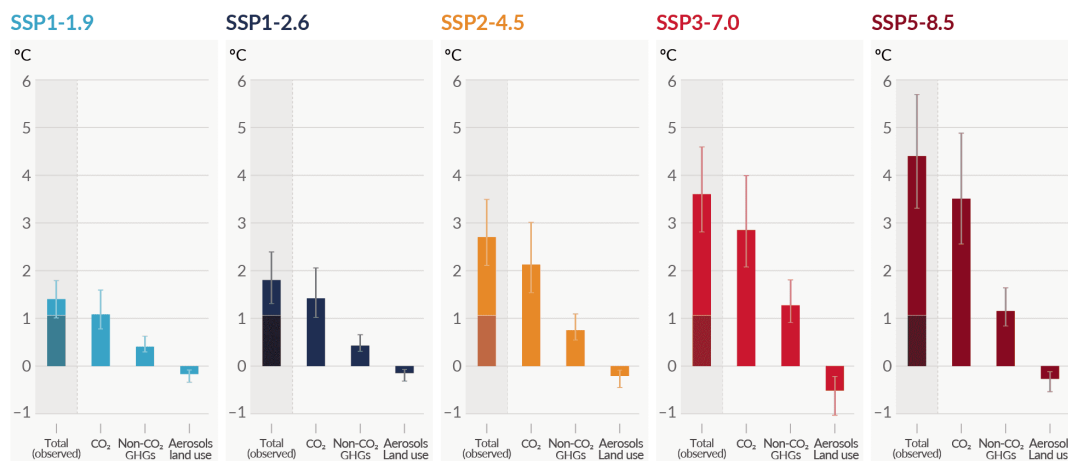
Future emissions cause future additional warming, with total warming dominated by past and future CO₂ emissions

(a) Future annual emissions of CO₂ (left) and of a subset of key non-CO₂ drivers (right), across five illustrative scenarios



(b) Contribution to global surface temperature increase from different emissions, with a dominant role of CO₂ emissions

Change in global surface temperature in 2081–2100 relative to 1850–1900 (°C)



Total warming (observed warming to date in darker shade), warming from CO₂, warming from non-CO₂ GHGs and cooling from changes in aerosols and land use

FIGURE 1.1 – Projections des émissions de GES par scénarios et leurs impacts sur le réchauffement global [1]

Projected changes in extremes are larger in frequency and intensity with every additional increment of global warming

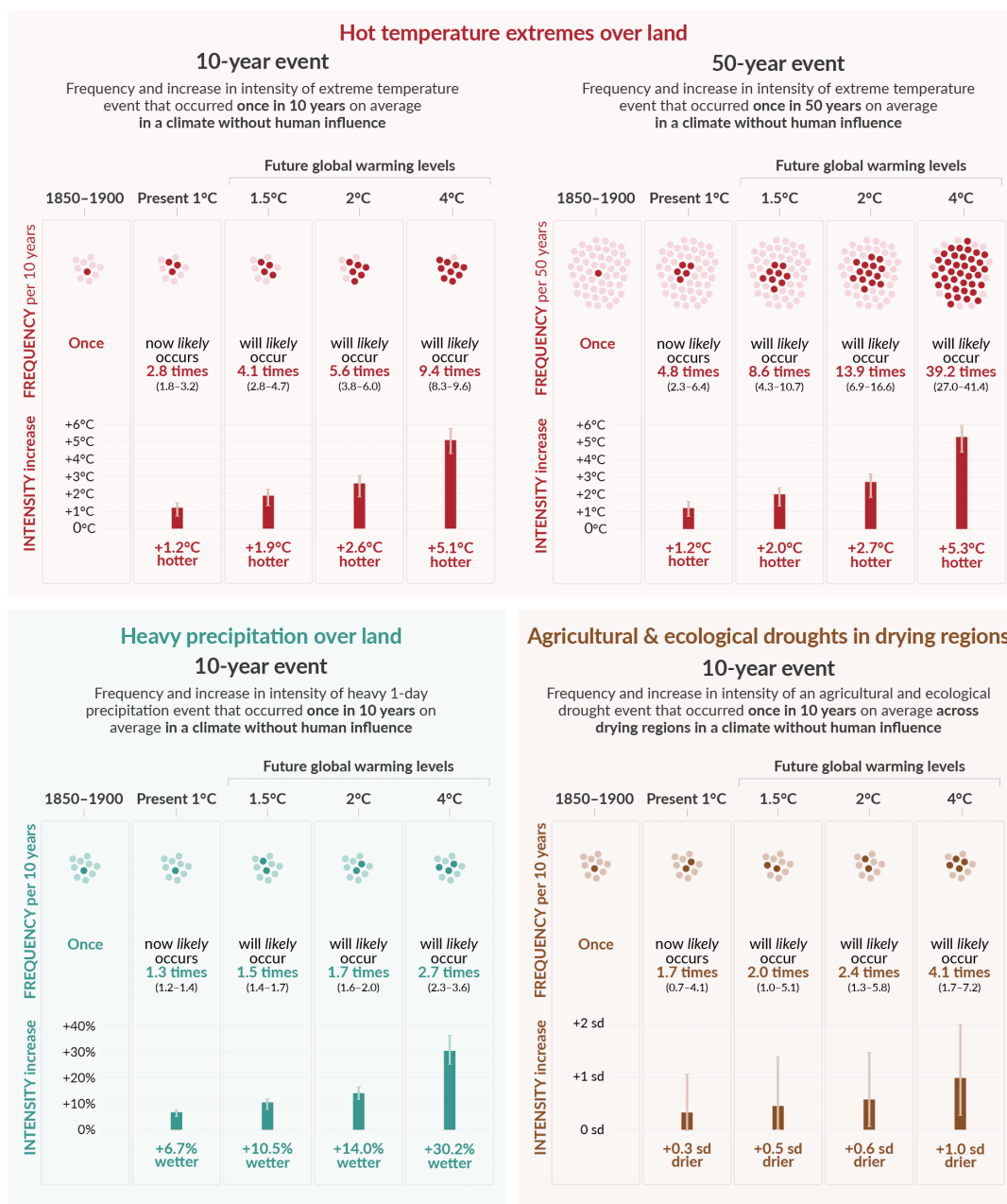


FIGURE 1.2 – Fréquence des événements climatiques extrêmes en fonction du réchauffement climatique global[1]

En % (données non corrigées des variations climatiques)

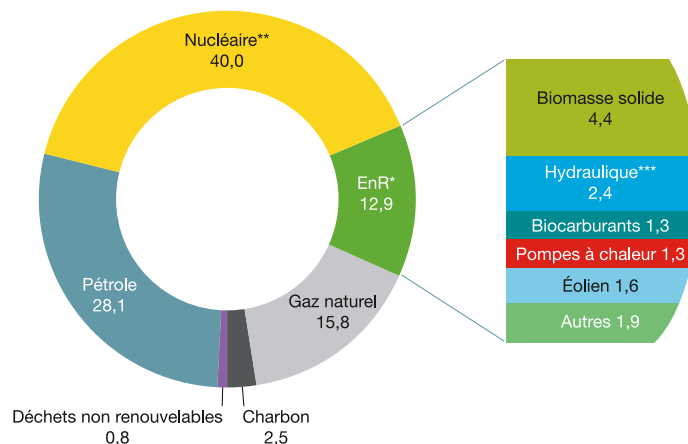


FIGURE 1.3 – Répartition des consommations d'énergie finale - France-2020 [7]

Le pétrole est la deuxième source d'énergie après le nucléaire en France, principalement utilisé dans le secteur des transports. Le gaz naturel est la troisième source d'énergie, dont 17% sont dédiés à la production d'électricité. L'utilisation de gaz naturel devrait diminuer lentement à l'avenir, notamment dans le secteur résidentiel, par la mise en application de la RE2020 qui pourrait limiter la pose de chaudière à gaz dans le secteur résidentiel grâce à la considération de l'impact sur le changement climatique dans son calcul [8]. Au niveau mondial, les consommations d'énergies proviennent majoritairement des énergies fossiles et notamment de produits pétroliers. Ainsi, le débat en France sur les questions de l'énergie est un cas particulier dans le monde puisque son approvisionnement est largement couvert par le nucléaire (à hauteur de 40%) alors qu'au niveau mondial, il ne représente que 5% des consommations d'énergie primaire. La Figure 1.4 permet de constater la place minoritaire de l'électricité dans les consommations d'énergies finales mondiales, même si sa part pourrait augmenter grâce à l'électrification de certains usages tels les transports. En 2021, la production d'électricité était majoritairement couverte par les énergies fossiles (environ 60% [9]) et représentait environ 40% des émissions de GES mondiales. Il y a donc bien un enjeu international sur la production d'électricité, de par son impact actuel et par son utilisation qui devrait croître. Les chiffres donnés ici proviennent de l'édition 2022 des chiffres clés de l'énergie fournie par le

ministère de la transition énergétique [7].

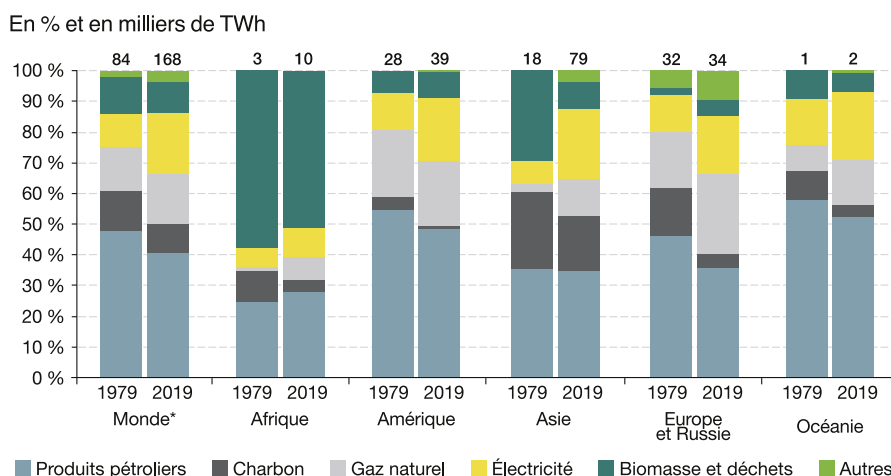


FIGURE 1.4 – Consommation d'énergie finale par continent [10]

1.2.2 Les engagements pour limiter le réchauffement climatique

La combustion d'énergie fossile étant le principal facteur des émissions anthropiques de GES, des engagements ont été pris internationalement, nationalement et localement pour limiter le réchauffement climatique. L'accord de Paris est le premier accord international sur le climat à caractère universel. Les pays signataires se sont engagés à atteindre le plus rapidement possible la neutralité carbone. Il engage également les pays développés à apporter un soutien financier aux pays les plus vulnérables face au changement climatique. Dans cette dynamique, la loi européenne sur le climat (Pacte vert) ambitionne une réduction des émissions de GES en Europe d'au moins 50% par rapport aux niveaux de 1990 pour parvenir à la neutralité climatique à l'horizon 2050 [11]. En France, la loi énergie climat de 2019 [12] prévoit notamment une réduction de 40% des énergies fossiles par rapport à 2012 et de lutter contre les passoires thermiques. Localement, des territoires choisissent des trajectoires encore plus ambitieuses. En France, la loi Énergie-Climat est fortement représentée par les Territoires à énergie positive pour la croissance verte (TEPV). Ces territoires s'engagent sur 6 axes présentés dans [13] avec des objectifs qui vont souvent au delà des réglementations nationales :

- Axe 1 : Réduire la consommation d'énergie dans le logement et l'espace public.
- Axe 2 : Diminuer les émissions de gaz à effet de serre et les pollutions liées aux transports.
- Axe 3 : Développer l'économie circulaire et la gestion durable des déchets.
- Axe 4 : Produire des énergies renouvelables locales
- Axe 5 : Préserver la biodiversité, protéger les paysages et promouvoir l'urbanisme durable
- Axe 6 : Développer l'éducation à l'environnement, écocitoyenneté et mobilisation locale

Il est donc notable que des engagements se font à chaque échelle et d'un point de vue énergétique reposent sur 3 piliers identifiés par [14], [15].

1. Sobriété : Réfléchir aux besoins réels pour une utilisation de l'énergie pour des services à fort potentiel d'utilité. Cela permet de ramener la consommation énergétique au plus près des besoins et d'éviter le gaspillage. La sobriété énergétique demande une reconsidération du rapport à l'énergie en agissant sur le dimensionnement des équipements, leur durée d'usage et leur mutualisation. Cela nécessite un changement de paradigme sur nos rapports à l'espace, au temps et au fonctionnement de la société.
2. Efficacité : Le but est d'améliorer les rendements des équipements permettant de couvrir les mêmes besoins en optimisant les consommations d'énergies.
3. Production d'énergie renouvelable : Le but est de tendre vers un mix énergétique à forte pénétration d'ENR pour se passer des moyens de production émetteurs de GES.

En considérant ces 3 piliers, le rapport de Réseau de transport d'électricité (RTE) [16], présente différents scénarios basés sur différents niveaux de sobriété et de mix énergétique, plus ou moins basés sur des ENR ou sur du nucléaire. Le site Internet [17] permet de comparer les différents scénarios. La comparaison se fait sur les consommations et les productions d'énergie, le coût et les émissions de CO₂ associées, l'utilisation des ressources ou encore la génération de déchets.

1.2.3 L'évolution des réseaux électriques

Dans les contextes présentés en 1.1 et 1.2.1, la réponse du secteur de l'électricité s'est faite par l'introduction de source d'énergies renouvelables. Les contraintes associées à la gestion de réseau électrique est que ces sources d'énergies sont décentralisées et intermittentes. Les réseaux électriques étaient jusqu'ici dimensionnés pour transporter l'énergie électrique de sources centralisées telles les centrales thermique ou nucléaires directement chez le consommateur. Le réseau était géré par un monopole de l'opérateur historique Électricité de France (EDF) gérant l'approvisionnement en électricité des sites de la production aux réseaux de distributions. La directive européenne 96/92/EC [18](mise à jour en 2003 par la directive 2003/54/EC) a mis fin au monopole d'EDF en libéralisant le marché de l'électricité. Cette libéralisation se fait dans un contexte de décentralisation des moyens de production qui complexifie la gestion de ces réseaux. En effet, la gestion ne se fait plus à partir de quelques dizaines de sites vers les consommateurs, mais à partir de milliers de points de production, tous différents les uns des autres. L'intermittence de cette énergie oblige également de revoir la manière dont elle est consommée. Une des solution envisagée est la création de "smart grid" pour automatiser et équilibrer le réseau électrique, en intégrant notamment des technologies de télécommunication. Il s'inscrit dans une perspective d'"internet de l'énergie"(IoE), visant à connecter tous les acteurs du réseau pour faciliter les échanges. Les compteurs communicants, comme Linky, illustrent cette démarche en permettant une meilleure connaissance de la consommation électrique, incitant ainsi les consommateurs à ajuster leur consommation lors des périodes de forte demande. Ainsi, les consommateurs sont devenus acteurs, produisant leur propre électricité, notamment via des installations photovoltaïques, et de nouveaux profils émergent, comme les utilisateurs de véhicules électriques. La figure 1.5 résume les changements physiques des réseaux électriques.

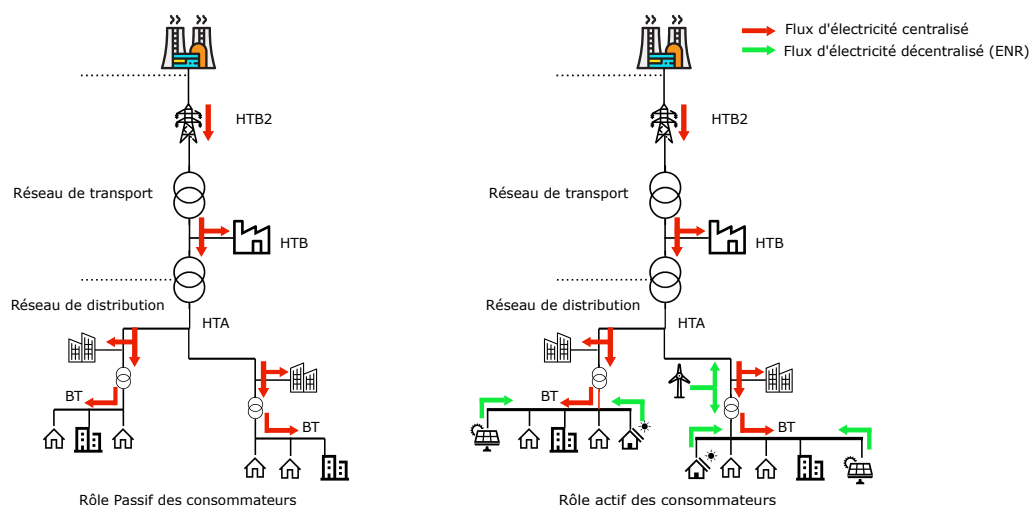


FIGURE 1.5 – Evolution des réseaux électriques

Pour répondre à ces évolutions, de nouveaux acteurs sur le marché de l'électricité ont vu le jour. Parmi eux, des producteurs comme Engie, proposant leur propre production sur les marchés de l'énergie, ainsi que des fournisseurs alternatifs tels que Total Energies, Enercoop, offrant une variété d'options aux consommateurs. Les agrégateurs sont des nouveaux acteurs apparus avec la création du marché des effacements. Ils garantissent l'équilibre entre la production intermittente d'électricité et les consommations sur une poche de réseau. Pour être efficace, l'agrégateur regroupe plusieurs consommateurs et participe au marché de l'effacement en combinant les capacités de modulation de chacun. Ainsi, il permet d'intégrer plusieurs consommateurs au marché de l'électricité en facilitant la gestion des variations de la demande. Enfin, la Commission de régulation de l'énergie (CRE) surveille les marchés de l'électricité en France et veille à leur bon fonctionnement en émettant notamment des propositions pour les prix réglementés.

1.3 Autoconsommation et communauté d'énergie

1.3.1 Autoconsommation individuelle et collective

La baisse des coûts des énergies renouvelables, notamment du photovoltaïque, a incité de nombreux consommateurs à investir dans leurs propres installations photovoltaïques. L'énergie produite par ces centrales peut être légalement scindée en 2 catégories :

- La vente totale de son électricité à EDF OA (Obligation d'Achat) qui est un dispositif contractuel entre le producteur et EDF régulé par la CRE à des tarifs avantageux pour le producteur d'énergie.
- L'autoconsommation individuelle qui est un dispositif permettant de consommer sa propre énergie, réduisant ainsi la facture énergétique globale.

Avec l'augmentation des tarifs de l'énergie provenant du réseau, l'autoconsommation prend une place de plus en plus importante sur le marché du photovoltaïque. Enedis estime que le nombre d'installations en autoconsommation individuelle a augmenté de 83% entre 2022 et 2023 et que 53% des installations photovoltaïque en France sont dédiées à de l'autoconsommation [19]. En France, l'autoconsommation est encadrée par le code de l'énergie[20] . L'autoconsommation individuelle permet à un producteur de consommer tout ou partie de l'électricité produite sur place, cependant, pour optimiser cette autoconsommation, il est nécessaire d'adapter la consommation aux périodes de production, ce qui peut être difficile pour un seul consommateur résidentiel. La limite est donc que si le consommateur ne consomme pas l'intégralité de l'énergie qu'il produit, celle-ci peut être considérée comme une perte économique, car les coûts d'investissement restent élevés et la rémunération du surplus injecté est faible. Ainsi, un effet rebond (paradoxe de Jevons) peut être observé sur l'autoconsommation individuelle : celle-ci pourrait inciter les consommateurs finaux à consommer plus d'énergie en raison de leurs installations d'autoconsommation [21]. Ainsi, pour optimiser l'utilisation des installations de production locales, l'Autoconsommation collective (ACC) a été autorisée en France en 2017, permettant à des producteurs et consommateurs sur le réseau basse tension de

partager leur production. Elle implique une fourniture d'électricité entre plusieurs producteurs et consommateurs liés au sein d'une entité morale. Cette approche vise à maximiser l'utilisation locale de l'énergie en exploitant les différences de profils de consommation entre les utilisateurs et en synchronisant leur consommation avec la production locale.

L'ACC présente plusieurs avantages, tant pour les opérateurs de réseaux que pour les participants. Elle permet de réduire les flux d'électricité sur les lignes, diminuant ainsi les risques de congestion et les coûts d'exploitation du réseau. De plus, elle favorise la répartition des coûts d'investissement des installations entre les participants, rendant ainsi ces installations plus accessibles financièrement. Le principal frein est au niveau réglementaire. Le texte stipule clairement qu'il est obligatoire de créer une personne morale pour superviser l'opération d'autoconsommation collective. Cette entité agit comme un intermédiaire entre les participants et le gestionnaire du réseau de distribution, facilitant ainsi la coordination et la gestion des flux d'électricité. Ensuite, pour les opérations dites étendues, l'arrêté du 21 novembre 2019 précise certaines conditions :

- Les participants doivent être connectés au réseau basse tension.
- La distance maximale autorisée entre deux participants est de 2 km.
- La puissance totale des installations ne doit pas dépasser 3 MW en métropole.

Depuis le 19 septembre 2023 [22], une dérogation permet d'étendre le périmètre de l'autoconsommation collective à 10 km en zone périurbaine et jusqu'à 20 km, dans les zones rurales. La création obligatoire d'une personne morale et les contraintes géographiques complexifient le montage des dossiers d'ACC. La dernière contrainte réglementaire réside dans la répartition de la production. En effet, les clefs de répartition de l'énergie sont principalement statiques pour alléger les contrats de fourniture. Le problème est que chaque participant se voit attribuer une partie fixe de la production, limitant les possibilités de flexibilité et créant bien souvent des situations de sur ou sous dimensionnement de la répartition. Dans les deux cas, cela représente une perte économique pour l'ensemble des acteurs, ramenant bien souvent aux mêmes problématiques que l'autoconsommation individuelle. Actuellement, Enedis répertorie 305 opérations d'autoconsommation collective actives à la fin du quatrième trimestre 2023 [19].

Ce faible nombre démontre les progrès en terme d'accessibilité à ce type de projet et à la simplification des démarches administratives qui l'accompagne.

1.3.2 Les Communautés d'énergie : Définitions

L'émergence des ENR au début des années 2000 a considérablement transformé la manière dont l'énergie est partagée et gérée. Il est devenu rapidement évident que la gestion énergétique serait de plus en plus locale. Ce changement de paradigme a été particulièrement mis en avant au Japon suite à l'accident nucléaire de Fukushima en 2011, poussant le gouvernement japonais à promouvoir les "smart communities" pour décentraliser la production d'énergie et favoriser l'utilisation des ENR [23]. Cependant, c'est en Europe que le concept de communauté énergétique (CE) a véritablement pris forme.

Juridiquement, le "Clean Energy Package", adopté par le Parlement européen en 2019, définit deux types de communautés énergétiques [11] :

- Les communautés d'énergie renouvelable sont des entités juridiques qui reposent sur une participation ouverte et volontaire, qui sont autonomes et contrôlées par des actionnaires ou des membres (personnes physiques, PME ou autorités locales) se trouvant à proximité de projets d'énergies renouvelables. Le but principal de telles structures est de fournir des avantages environnementaux, économiques ou sociaux à ses membres. La loi Energie Climat du 8 novembre 2019 [24] retranscrit la notion de communauté d'énergie renouvelable en droit français. Ainsi, une communauté d'énergie renouvelable est autorisée à produire, stocker et vendre de l'électricité d'origine renouvelable, à partager en son sein l'électricité produite et d'accéder aux marchés de l'énergie soit directement, soit par l'intermédiaire d'un agrégateur.
- Les communautés d'énergie citoyennes sont une extension géographique des communautés d'énergies renouvelables, puisque celles-ci ne sont pas limitées dans l'espace géographique. Leur but principal est de permettre à ses membres d'accéder aux marchés de l'électricité. La définition européenne est retranscrite dans le droit français au travers de l'Article L292-2 du Code de l'énergie entré en vigueur le 1er juillet 2021.

Ce paragraphe ne définit que le cadre légal d'une communauté d'énergie mais la littérature scientifique permet d'identifier d'autres définitions de Communauté d'énergie (CE) qui seront définies en 2.2.1.

1.4 Expérimentations existantes

1.4.1 Position des laboratoires de recherche Français

En France, le thème des communautés d'énergie prend de l'ampleur dans les laboratoires de recherche. La thématique est arrivée au sein du L2EP par la thèse [25] dans laquelle une gestion de l'énergie photovoltaïque est proposée grâce à la théorie des jeux et à la technologie blockchain. Le laboratoire GE2LAB travaille également sur la thématique. Dans [26], l'auteure propose par exemple dix méthodes de gestion de l'énergie au sein d'une communauté. L'Institut de Recherche en Énergie Électrique de Nantes Atlantique (IREENA) travaille également sur le sujet, comme en témoigne [27]. Dans cet article, l'auteur compare deux clés de répartition de l'énergie dans un contexte d'autoconsommation collective. Les expérimentations de la plateforme smart-grid du Liten¹ du CEA [28], témoignent également de l'intérêt de la recherche Française sur les smart grids.

Les laboratoires français traditionnellement axés sur les Sciences de l'Ingénieur (SI) s'ouvrent et collaborent de plus en plus à d'autres disciplines. Ce fut par exemple le cas de la thèse ModAICSS [29] soutenue au L2EP en 2019. Dans ce travail, une supervision énergétique basée sur la théorie des jeux et la logique floue a été établie pour étudier l'équilibre entre les objectifs du réseau et les sensibilités des consommateurs. Autre exemple, les auteurs de [30] issus du G2Elab présentent une gestion d'énergie domestique avec une approche mettant "l'humain dans la boucle".

Enfin, la question de l'impact environnemental des smart grids et des consommations énergétiques n'est pas vraiment directement traitée dans les laboratoire Français travaillant sur le management de l'énergie. Cette problématique n'est

1. Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles et les nanomatériaux

pas liée au contexte français, puisque, comme discuté en 2.3.2, il existe un gap dans ce domaine à l'échelle de la recherche mondiale concernant les smart grids. Malgré des objectifs annoncés de réduction d'impact environnemental, celle-ci n'est que partiellement chiffrée dans la littérature.

1.4.2 Exemples d'expérimentations en France

Le sujet de l'intégration des énergies renouvelables (ENR), de l'autoconsommation collective et des communautés d'énergie a suscité l'intérêt de divers acteurs, tant publics que privés, en France. Ces questions sont importantes pour les décideurs en matière d'orientation des politiques énergétiques. Plusieurs projets à échelle réelle ont été déployés sur le territoire français. Le site internet "Energie Partagée" [31] fait une liste non exhaustive des projets participatifs en France. Dans la région "Haut de France", nous pouvons notamment citer l'opération d'autoconsommation collective déployée à Pérenchie dans le cadre de la troisième révolution industrielle [32] ou encore le projet participatif Mine de Soleil à Loos en Gohelle [33] où des énergies renouvelables sont déployées grâce à des investissements publics, privés et citoyens. Ailleurs, nous pouvons citer des projets comme le projet MAESTRO [34] porté par Geredis et le L2EP [35], ou encore les projets sur les îles d'Ouessant ou de Marie Galante, respectivement appelés INTERREG MANCHE « ICE » (Intelligent Community Energy) et MAIA. [36] [37]. Ces initiatives expérimentent des méthodes de gestion énergétique par la demande afin de maximiser l'utilisation des sources renouvelables. Concernant les smart grids, l'association Think Smart grid a été établie en 2023, avec le soutien de l'Agence de la transition écologique (ADEME) et de la FNCCR (Fédération nationale des collectivités concédantes et régies), un livre blanc pour le déploiement de smart grid en France [38]. Alors que de nombreux travaux de recherche se concentrent sur la flexibilité et l'intégration des énergies renouvelables, la principale motivation actuelle du déploiement des smart grids est l'intégration des véhicules électriques, qui représenteront 43% des parts de marché des smart grids en 2030, contre 14% pour l'intégration des énergies renouvelables selon [39]. Cette tendance s'explique par la forte croissance attendue du marché de la mobilité électrique, bien que l'intégration des

énergies renouvelables soit également possible sans smart grids. La flexibilité et le pilotage de la demande restent cependant marginaux sur le marché, puisque la part totale des marchés des bâtiments intelligents ne représentera que 13%, incluant notamment l'autoconsommation [39].

1.4.3 Position du sujet de recherche à l'étranger

La thématique des smart grids et de la gestion énergétique est aujourd'hui importante à l'échelle européenne. En effet, les thèmes énergie et climat sont portés par le programme européen Horizon 2020 [40]. Parmi l'ensemble des projets financés par ce programme, le projet ebalanceplus [41] est particulièrement intéressant dans le contexte de ce travail de thèse. Le projet a pour ambition de créer une plateforme énergétique qui permettra d'exploiter des flexibilités énergétiques au service des Gestionnaire du Réseau de Distribution (GRD). Le projet ambitionne une approche sociale du problème en incluant les besoins et les préoccupations des utilisateurs dans la gestion d'énergie. Concernant les expérimentations autour des communautés d'énergie, la dynamique est principalement portée par les pays du Nord, notamment l'Allemagne et les Pays-Bas. Le site internet "enercommunities.eu" [42] répertorie les projets de communautés d'énergie européens, tandis que le rapport du Joint Research Centre (JRC) définit les notions de communautés d'énergies et les innovations attendues sur ce sujet [43]. Ce rapport met en avant les motivations économiques, environnementales et sociétales qui sous-tendent la création de ces structures. Il souligne également que les politiques actuelles en Europe ne sont pas toujours incitatives et que des efforts supplémentaires doivent être déployés par les États membres pour favoriser leur développement. Enfin, dans une étude publiée en 2019, Hewitt fait un état des lieux des communautés énergétiques dans le monde et met en lumière les avancées sociales qu'elles peuvent apporter [44].

1.5 Conclusion et objectifs du sujet

La thèse s'inscrit dans le contexte de réduction de l'empreinte environnementale des consommations d'énergies. La transition énergétique nécessaire dans le

secteur de l'électricité se fait essentiellement autour des technologies d'énergies renouvelables. Leur intermittence bouleverse la gestion des réseaux électriques et des réponses technologiques comme les smart grids émergent. De nouveaux concepts réglementaires voient le jour, tels les communautés d'énergies et l'autoconsommation d'énergie. Cependant et paradoxalement, la consommation d'énergie porte les activités humaines, mais le comportement humain n'est pas systématiquement considéré dans les travaux de recherche autour de la gestion énergétique. Ainsi, malgré des performances théoriques de plus en plus importantes, la performance applicative des systèmes énergétiques est bien souvent dégradée [45]. Dans leurs travaux, [46] et [47] exposent les apports et les limites que les SHS peuvent apporter aux SI. De plus, les avancées réglementaires peinent à être mises en application à cause de leur complexité de mise en œuvre contractuelle. Cette complexité peut s'expliquer en partie par de nouveaux paradigmes de partage d'énergie introduits dans des logiques de marchés qui ne sont pas toujours adaptées [38]. Enfin, la recherche autour de la gestion énergétique a souvent pour principal objectif de répondre à la problématique environnementale, mais l'apport des solutions sur ce paramètre est rarement correctement chiffré. Cette thèse a donc plusieurs vocations :

- Proposer une nouvelle méthode de management énergétique dans une communauté d'énergie basée sur le partage d'énergie et la coopération.
- Inclure une composante comportementale des usagers dans cette gestion, comme dans les travaux [29], permettant une vision interdisciplinaire du sujet.
- Présenter les limites de cette méthode et soulever les problématiques organisationnelles et éthiques de celle-ci.
- Proposer une base de méthodologie de quantification des impacts environnementaux des consommations d'énergie

Ce présent chapitre avait pour objectif de présenter les différents contextes dans lesquels s'inscrivent ces travaux de recherche. Cette thèse s'appuie sur une interdisciplinarité qui oblige à se poser différentes problématiques en fonction du point de vue abordé. Le sujet étant vaste, un cadrage plus précis des travaux sur l'ensemble des thèmes évoqués sera fait dans le prochain chapitre.

Positionnement du sujet

Sommaire du présent chapitre

Introduction	26
2.1 Les nouvelles gestions des réseaux électriques	27
2.1.1 Généralités	27
2.1.2 Les moyens technologiques au services des Manage- ment par la demande (Demand Side Management) (DSM)	28
2.1.3 Les algorithmes d'optimisations des DSM	30
2.1.4 Limites des DSM	32
2.2 Organisation de la gestion de l'énergie	34
2.2.1 Qu'est ce qu'une communauté d'énergie?	34
2.2.2 Les profils des participants : les joueurs de la commu- nauté	37
2.2.3 Le changement des comportements, un enjeu majeur de la transition énergétique	41
2.2.4 Les nouvelles organisations des marchés : les règles de la communauté	43
2.2.5 La théorie des jeux : la modélisation des interactions pour optimiser les consommations énergétiques . . .	45

2.3 Contexte environnemental	49
2.3.1 Les différents impacts environnementaux	49
2.3.2 La question environnementale et les smart grid . . .	54
2.4 Conclusion	58

Introduction

Dans les différents contextes exposés dans le chapitre 1, il est possible d’orienter les travaux de thèse vers plusieurs sujets. Ce chapitre vise donc à approfondir les divers sujets abordés et à définir les contours du travail de recherche. Ainsi, ce chapitre permet de faire l’état de l’art sur l’ensemble des thématiques abordées dans ces travaux de recherche et permet d’appuyer les différentes hypothèses prises dans les prochains chapitres.

Tout d’abord, il est nécessaire de se pencher en détail sur les travaux existants en matière de management énergétique. Cette revue de littérature permettra de mettre en lumière un gap de la recherche sur les smart grids : les solutions proposées sont bien souvent uniquement technologiques et leur performance est bien souvent dégradée dans leur mise en pratique car la dimension de l’utilisateur n’a pas été intégrée. Les communautés d’énergie viennent bouleverser le rapport humain/énergie et il conviendra ensuite de les définir précisément. Pour obtenir une approche multidisciplinaire, il sera également crucial d’explorer l’ensemble des aspects des sciences humaines et sociales (Sciences Humaines et Sociales (SHS)) relatifs aux habitudes et aux comportements liés à l’énergie pour mieux comprendre les objectifs des communautés d’énergie, leur gouvernance et les comportements individuels de leurs participants. Les nouveaux modèles économiques seront ensuite discutés, et la théorie des jeux sera brièvement présentée, car elle permet de modéliser l’ensemble des interactions possibles. Enfin, une attention spéciale à la quantification des impacts environnementaux doit être portée. Pour cela, nous nous intéresserons à ce sujet afin de pouvoir proposer une méthode de quantification concernant les smart grids.

2.1 Les nouvelles gestions des réseaux électriques, un changement au service de la transition énergétique

2.1.1 Généralités

La décentralisation de la production d'énergie amène de nouveaux paradigmes en terme de gestion énergétique. Comme évoqué en 1.2.3, l'introduction de sources d'énergies décentralisées exige des implications de l'ensemble des acteurs du réseau dans sa gestion. Ainsi, les supervisions énergétiques qui permettaient traditionnellement de maintenir l'équilibre des réseaux en diminuant ou en augmentant les moyens de production centralisés aux consommations prévues ou constatées doivent intégrer de nouveaux paramètres. Ainsi, de nouveaux moyens sont déployés pour éviter d'importantes fluctuations sur le réseau en terme de consommation. Des actions sont donc demandées aux consommateurs pour réguler le réseau, c'est ce qui est appelé le Demand Side Management DSM. Il existe 2 types de DSM :

- Les DSM qui ont pour but de réduire les consommations d'énergies : Ce sont par exemple les demandes d'effacement. Il est demandé à un consommateur de ne pas consommer l'énergie qu'il avait initialement prévue.
- Les DSM qui ont pour but de décaler les consommations d'énergies. Cela permet de décaler dans le temps les consommations pour les ajuster aux productions. La réduction de celles-ci n'est donc pas l'objectif de ce type de gestion.

Une liste non exhaustive de ces méthodes est présentée dans les articles [48] et [49]. Dans les deux cas, les DSM permettent de lisser les courbes de consommation et permettent d'éviter des pics ou des creux de consommation qui pourraient être problématiques pour les Gestionnaire du Réseau de Distribution (GRD). Deux paramètres permettent de chiffrer les apports d'une gestion énergétique aux GRD :

- Le Peak-to-Average Ratio (PAR) : C'est le rapport entre la puissance maximale et la puissance moyenne mesurées sur une journée : Il peut être

calculé grâce à l'équation (2.1)

$$\text{PAR} = \frac{\max L}{\bar{L}} \quad (2.1)$$

- La Squared Euclidean Distance (SED) : C'est la somme des carrés des distances entre la puissance pour un pas de temps donné et la puissance moyenne sur la journée. Elle est calculée grâce à l'équation (2.2)

$$\text{SED} = \sum_{k=1}^K (L_k - \bar{L})^2 \quad (2.2)$$

2.1.2 Les moyens technologiques au services des DSM

Les nouvelles gestions de l'énergie sont possibles grâce à de nouvelles technologies. En effet, les Technologies de l'Information et de Communication (TIC) apportent de nouveaux usages. Les smart meters permettent ainsi aux utilisateurs de connaître en détail leurs consommations énergétiques par usage. Une des possibilités fournies par l'Internet of things (Internet des objets) (IOT) est d'échanger de l'information entre divers appareils et de pouvoir les commander automatiquement ou à distance. Grâce à ces technologies, les gestions énergétiques vont pouvoir se reposer sur 3 piliers :

- Les moyens de stockage : C'est la solution technologique la plus étudiée en littérature. En effet, un système de stockage permet de maximiser les consommations d'énergie provenant de systèmes de production décentralisés et d'utiliser l'énergie stockée en période de pics. D'un point de vue économique, il est également possible de stocker l'énergie dans les périodes où les tarifs de l'énergie du réseau sont faibles pour utiliser l'énergie lorsque les tarifs sont plus importants. Tout ceci peut se faire automatiquement sans l'intervention de l'utilisateur final. Ainsi, une réduction des pics de consommations sur le réseau de distribution est proposée dans [50] et [51] grâce à des systèmes de stockage couplés à de la production d'énergie renouvelable.
- Les moyens de flexibilité : Le but est de créer une programmation des appareils au sein des foyers pour décaler les consommations et ainsi alléger le réseau en période de pic. Dans l'ensemble des études menées sur ce sujet,

les appareils sont classés par type en fonction de leur disponibilité et de leur capacité à être décalés dans le temps, mais dont la puissance n'est pas modulable. Dans les appareils flexibles, nous pouvons notamment citer les ballons d'eau chaude et les appareils de type cycle (par exemple une machine à laver). Ainsi, dans [52], une minimisation des coûts de l'énergie par la flexibilité est proposée. Le décalage d'appareils de type cycles permet, d'après ces études, de baisser la facture énergétique d'un foyer d'environ 35% tout en faisant baisser le nombre de pics de consommations mensuels. Dans cet autre article [53], une gestion par les flexibilités d'appareils couplée à un stockage est proposée. Grâce à un algorithme génétique, l'auteur propose une solution qui permettrait de réduire jusqu'à 70% les coûts énergétiques tout en diminuant de 40% le Peak Average Ratio (PAR).

- Les nouvelles technologies de transports : les véhicules électriques peuvent apporter des solutions de flexibilité. Il existe dans la littérature de nombreux exemples d'optimisation de charge de véhicules électriques pour maximiser la consommation d'énergies renouvelables ou simplement pour atténuer les contraintes qu'il peut y avoir sur un réseau basse tension. Par exemple, dans [54], une optimisation multicritère pour la charge de véhicules de particuliers est proposée, ou encore dans [55] où une coordination de charge de véhicules domestiques et des véhicules stationnés en domaine public est proposée. Malgré leurs apports en termes de gestion énergétique, ceux-ci risquent de représenter un déport énergétique provenant d'énergie fossile vers des consommations électriques, ce qui pourrait amener de forts appels de puissance et donc des contraintes sur le réseau électrique. Cette solution pourrait, non pas être considérée comme une solution d'allègement pour le réseau, mais comme une nouvelle contrainte à prendre en compte [56]. Pour pallier à cette possible contrainte, le Vehicle to grid (V2G) peut apporter une nouvelle forme de flexibilité. Le véhicule électrique pourrait alors être considéré comme un système de stockage, puisqu'il pourrait soit absorber de l'excédent d'énergie, soit devenir une source d'énergie [57, 58]. Bien sûr les contraintes associées sont différentes car la fonction principale du véhicule électrique reste la mobilité.

La Figure 2.1 résume les différentes technologies utilisées dans les systèmes de gestion énergétique.

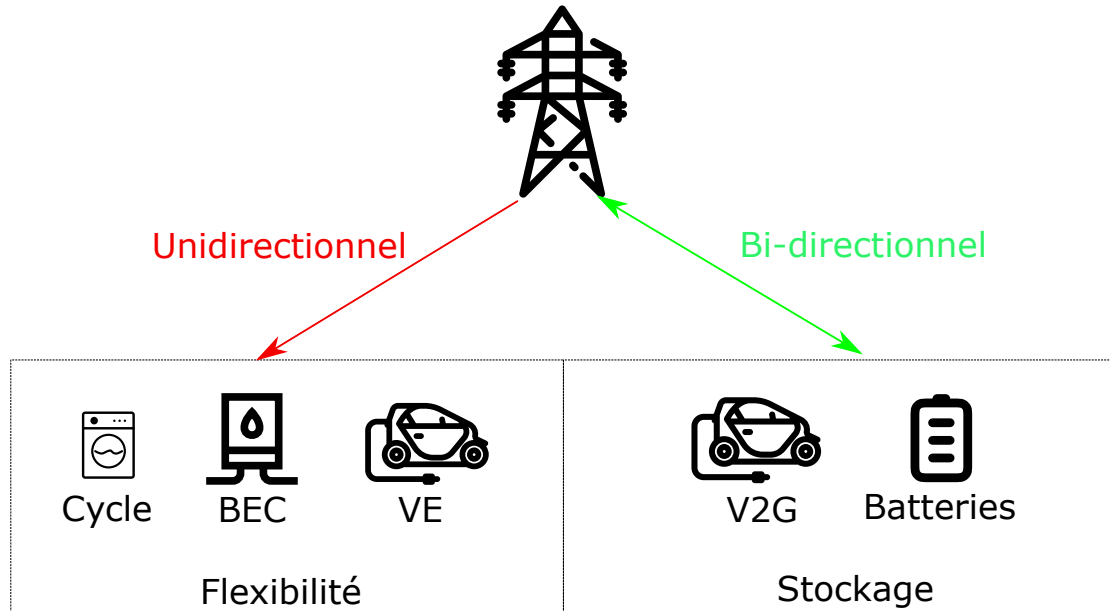


FIGURE 2.1 – Résumé des outils de management énergétique

Cette partie présente la partie physique nécessaire aux gestions énergétiques. En parallèle de ces couches physiques, les DSM reposent sur des algorithmes d'optimisation qui permettent la coordination entre tous les appareils cités ci-dessus.

2.1.3 Les algorithmes d'optimisations des DSM

La première étape dans la mise en place d'un système de supervision est de définir sa structure. Il existe deux grandes approches de la gestion énergétique :

- Les méthodes centralisées : Une entité centrale, tel un agrégateur, possède l'ensemble des paramètres nécessaires pour optimiser consommations et productions. C'est la méthode qui amène les meilleurs résultats en contrepartie d'un temps de calcul important. Une infrastructure de communication robuste est nécessaire pour que l'agrégateur puisse récolter l'ensemble des données. Ces données sont également bien souvent privées et/ou confidentielles, une bonne protection des données est alors nécessaire. Ainsi, ces

modèles se font de plus en plus rares dans la littérature et sont principalement utilisés dans des contextes d'échanges énergétiques entre microgrids où un agrégateur général donne les directives pour une utilisation optimale de l'énergie, comme présenté dans [59]. Ces méthodes sont cependant de nouveau utilisées dans des contextes de gestion de communauté d'énergie grâce à la théorie des jeux et plus précisément aux jeux collaboratifs. (Voir 2.2.5)

- Les méthodes décentralisées : chaque acteur va optimiser localement ses flux d'énergies, l'agrégateur ne fait que recueillir l'ensemble des résultats de toutes les optimisations. Le temps de calcul est ainsi largement diminué, car chaque optimisation se fait en parallèle. De même, les infrastructures de communication seront moins robustes, puisque moins de données circuleront sur ces réseaux. Une anonymisation des données est aussi plus facile à mettre en œuvre. La principale contrainte est de devoir équiper chaque acteur d'un dispositif de calcul.

L'auteur de l'article référencé [60] dresse un état des lieux des méthodes de gestion énergétique, tant centralisées que décentralisées, et conclut qu'une tendance se dessine en faveur des approches décentralisées. Dans tous les cas, les technologies de communication jouent un rôle essentiel dans ces modes de gestion. L'accès, le traitement et la circulation des données constituent des aspects cruciaux à prendre en compte. Il est impératif de garantir la fiabilité des données, de disposer des compétences et des outils appropriés pour les interpréter, tout en assurant la sécurité des données sensibles et privées.

Une fois l'approche décidée, il est nécessaire d'implanter les algorithmes d'optimisation. Les articles [61] et [62] nous donnent des visions globales des différentes méthodes d'optimisations utilisées dans l'intégration d'Énergies Renouvelables (ENR) et dans les gestions énergétiques. Ces méthodologies sont choisies en fonction du problème à traiter et aux moyens pour les traiter (nombre de données disponibles). Il existe deux grandes méthodologies d'optimisation majoritairement utilisées dans la littérature :

- Les méthodes d'optimisation continue : Dans cette famille d'optimisation, nous pouvons retrouver la programmation linéaire, la programmation non

linéaire et la programmation dynamique. Un exemple d'optimisation de l'utilisation d'énergie Photovoltaïque (PV) grâce à un programme linéaire est présenté dans [63]. De même, dans [64], une stratégie de contrôle d'un système hybride de stockage est élaborée grâce à la programmation dynamique.

- Les méthodes d'optimisation combinatoire : Souvent inspirées de phénomènes naturels, elles offrent l'avantage de pouvoir être appliquées à diverses problématiques, indépendamment des caractéristiques mathématiques de la fonction à optimiser. Leurs principaux atouts résident dans leur adaptabilité, leur faible coût de calcul et leur facilité d'implantation. Cependant, il est essentiel de prêter une attention particulière à leur paramétrage, notamment dans le cas de fonctions objectifs complexes où plusieurs minima locaux peuvent être présents. Ces algorithmes peuvent en effet converger vers un minimum ou un maximum local qui peut être éloigné de la solution optimale globale. L'auteur de [62] fait une revue de littérature sur l'utilisation des techniques d'optimisation métaheuristique dans les contextes de gestion de réseaux électriques.

La méthode d'optimisation n'est pas un objectif en soi ici. Il existe de nombreux travaux de recherche discutant des avantages et des inconvénients de chacune de ces méthodes. La méthode d'optimisation est ici un outil utilisé pour la création d'un superviseur énergétique dans lequel le contexte social d'une communauté est considéré ainsi que les comportements associés de ses participants, tout en considérant l'impact environnemental global de la solution. La méthodologie retenue dans ces travaux sera présentée en 3.4.3.

2.1.4 Limites des DSM

La principale critique de DSM réside dans sa dépendance aux technologies de l'information. D'un point de vue social, l'accès à ces solutions peut être discuté selon plusieurs facteurs. Premièrement, leur implantation peut être coûteuse et accentuer des inégalités déjà importantes dans l'accès à l'énergie. L'accès aux nouvelles TIC est en partie limité par le niveau de vie des ménages. Ainsi, d'après l'enquête INSEE concernant l'accès à Internet et à un ordinateur en fonction

du niveau de vie [65], parmi les 10% de la population ayant le niveau de vie le plus faible, 56% possédaient un ordinateur portable et 60% une connexion internet en 2017. Ces chiffres montent respectivement à 78% et 82.5% pour les 10% de la population avec le niveau de vie le plus élevé. À cela, il est nécessaire d'introduire la problématique de précarité énergétique. Le risque est de donner un accès à une meilleure gestion de l'énergie à ceux qui en ont aujourd'hui le moins besoin financièrement. L'autre problématique vient des connaissances et des compétences concernant ces technologies. Ainsi émerge la question de l'illectronisme. Il s'agit de la difficulté, voire de l'incapacité, à utiliser les appareils numériques et les outils informatiques en raison d'un manque ou d'une absence totale de connaissances à propos de leur fonctionnement [66], phénomène qui risque de mettre à l'écart une certaine partie de la population. Selon l'INSEE 17% de la population française est concernée par l'illectronisme. Un autre facteur important à l'accès à ces technologies est l'âge de la population. Toujours d'après l'enquête INSEE [65], 46,8% de la population de plus de 75 ans possèdent un ordinateur contre 94,4% des 16-29 ans. L'autre incertitude de ces changements de paradigme provient de l'objectif de réduction de l'impact environnemental des smart grids. Comme il sera détaillé plus en profondeur dans 2.3, un des objectifs affichés dans l'implantation de gestion d'énergie automatisée est de réduire l'impact sur le changement climatique des consommations d'énergies. Or, cette réduction n'est pas toujours correctement chiffrée et ne prend pas en compte l'impact que ces solutions pourraient avoir sur d'autres paramètres environnementaux. Ainsi, même si l'ensemble de ses usages ne concernent pas la gestion énergétique, le secteur du numérique représente 10% de la consommation électrique et 2.5% des émissions de gaz à effet de serre en France [67]. Comme le présente la figure 2.2 tirée du rapport [68], tous les scénarios de projections des consommations énergétiques du numérique sont à la hausse. Dans ce rapport, il est également précisé que les émissions de CO₂ attribuées au numérique ont augmenté de 450 millions de tonnes dans l'OCDE depuis 2013, pendant que leurs émissions globales ont diminué de 250 millions de tonnes. Comme le rappelle l'Agence Internationale de l'Energie, l'apport du numérique peut être bénéfique dans les gestions énergétiques, mais une attention particulière doit être portée à l'effet de rebond qu'il peut engendrer sur les

consommations globales [69].

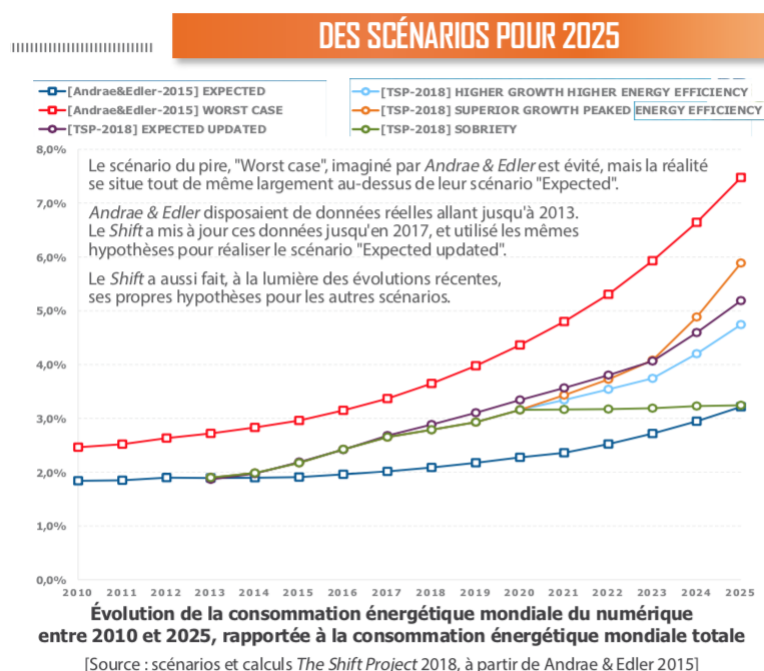


FIGURE 2.2 – Scénarios d'évolution des consommations énergétiques du numérique [68]

2.2 Les structures humaines, une organisation à ne pas négliger

2.2.1 Qu'est ce qu'une communauté d'énergie ?

Comme décrit en 1.3, la décentralisation de la production d'électricité a amené des problématiques de consommations locales d'énergie. Dans ce cadre, la législation a permis de construire des structures appelées « communautés d'énergie » pour notamment faciliter les enjeux autour de l'autoconsommation. La littérature autour des communautés d'énergies est cependant beaucoup plus vaste que ces concepts juridiques. Ainsi, il n'existe pas véritablement de consensus autour de la définition de communauté d'énergie et les définitions retenues dépendent de la discipline qui les étudie. De plus, la nature d'une communauté

va aussi influencer le recrutement des profils la composant. En effet, suivant la définition retenue, la communauté peut être plus ou moins sélective dans les profils individuels la composant. Dans [70] l'auteur fait une revue de littérature sur les différentes définitions de communauté d'énergie existantes. Parmi celles-ci, nous pouvons notamment retenir :

- Une communauté peut être assimilée à une certaine proximité spatiale. En ce sens, les participants de ce type de communauté sont reliés principalement par leur appartenance à un territoire.
- Une communauté d'énergie peut être définie comme un lieu d'échange et de partage d'énergie. Cette définition rejoint en partie le cadre légal, puisque la communauté d'énergie se définit autour d'un marché.
- Une communauté d'énergie peut être définie autour d'une infrastructure, typiquement un micro réseau électrique. Ainsi, un GRD peut ainsi créer une communauté d'énergie composée d'une poche de réseau, afin de faciliter l'intégration d'énergie renouvelable.

Ces visions sont souvent utilisées dans le cadre de recherche autour des Sciences de l'Ingénieur (SI). L'élaboration de ces communautés est souvent couplée à un développement de technologies de l'information. Les liens entre les participants de la communauté n'existent que contractuellement ou grâce à une connexion physique à un réseau d'énergie. L'intérêt de ce type de communauté réside dans la capacité à déployer des solutions techniques performantes pour mieux distribuer l'énergie entre participants. Le facteur humain, n'est alors que peu étudié, et les solutions optimales techniquement peuvent voir leurs performances dégradées car elles ne considèrent pas les connaissances, et implications des utilisateurs de ces solutions [45]. Dans ce type de communauté, le recrutement est large, puisque n'importe quel consommateur de la zone géographique concernée peut la rejoindre. Les liens se résument à des contrats commerciaux, grâce auxquels les consommateurs achètent directement ou indirectement de l'énergie aux producteurs. [70] répertorie des définitions au delà de celles proposées dans les SI.

- Une communauté d'énergie peut se former autour d'un but, d'une finalité commune. Les relations sociales sont ainsi spécifiquement définies par une

forte participation et une typologie spéciale de gouvernance. On retrouve dans ce genre de communauté un très fort volontariat et un fort engagement collaboratif autour de projets énergétiques.

- Une communauté peut se construire autour de croyances ou de valeurs communes. Les participants se réunissent alors pour former, soit :
 - Un acteur énergétique à part entière qui prend des décisions et interagit avec ses pairs.
 - Un réseau social de l'énergie, le thème de l'énergie permettant l'élaboration de groupes où il y a des interactions fortes. On parle alors de communauté d'intérêts.
 - Une identité, le thème de l'énergie permettant de se définir en tant que groupe social. Les participants à ce type de communauté possèdent des modes de vies similaires et partagent les mêmes idéologies autour de ce thème.

Ces définitions sont représentées dans les SHS. Elles ne sont pas forcément accompagnées d'un déploiement massif de technologie, mais reposent sur des nouvelles formes d'organisation et de gouvernance. L'énergie devient alors un vecteur de décision et d'organisation. Par exemple, dans [71], une communauté d'énergie est présentée. Celle-ci est basée sur un habitat participatif ayant adhéré à l'autoconsommation collective. Les problématiques autour de l'organisation des participants sont présentées en même temps que les innovations de gouvernance que cette typologie de projet a apportées. Ces communautés sont par essence fermées et le recrutement de leurs membres plus spécifique, des connaissances ou au minimum une volonté de s'investir dans la démarche, est demandé aux participants. Outre les communautés d'énergies définies par la réglementation (dont les objectifs sont principalement de permettre une décentralisation des marchés d'énergies), les différentes communautés d'énergies telles que définies ci-dessus peuvent poursuivre plusieurs objectifs, comme présentés dans [72] et [73] :

- Des objectifs économiques tels que réduire les factures énergétiques, ou avoir une énergie abordable.

- Des objectifs environnementaux, comme par exemple réduire les émissions de gaz à effet de serre
- Des objectifs sociaux, la communauté peut renforcer la cohésion sociale.
- Des objectifs politiques, la communauté recherche de l'autonomie pour ne pas dépendre des infrastructures régionales ou nationales sur lesquelles les consommateurs ont moins de pouvoir décisionnel.
- Des objectifs d'infrastructures : rechercher l'indépendance énergétique, notamment pour ses approvisionnements énergétiques dépendants d'importations comme le pétrole, ou l'uranium.

2.2.2 Les profils des participants : les joueurs de la communauté

En dehors des objectifs communs établis par une communauté d'énergie, il est nécessaire de comprendre les motivations personnelles d'un acteur à participer à une opération de management énergétique. En effet, certaines motivations sont propres aux individualités, quand d'autres sont communes avec les motivations de groupe.

La motivation financière

La question est souvent abordée de manière financière, l'hypothèse étant que si un consommateur se voit restituer un même service avec une facture moins élevée, alors le système proposé apportera les résultats escomptés sur la gestion du réseau électrique. Les exemples sont nombreux dans la littérature : dans [74], un système de Home Energy Management Systems (HEMS) qui permet de réduire les contraintes du réseau tout en diminuant les coûts énergétiques est proposé dans le contexte Malaisien. Les mêmes conclusions dans le contexte Indien sont tirées dans [75] et les auteurs de [76] démontrent l'intérêt financier et pour le réseau dans un contexte plus global. Certes, l'avantage financier est l'un des premiers facteurs de réussite des gestions énergétiques, et l'accessibilité financière des technologies d'énergies renouvelables [77] [78] ou de flexibilités

[79] [80] est un facteur déterminant dans l'adoption de ces technologies. Cependant, au vu du contexte environnemental, il est possible de se poser la question : *Des consommateurs seraient-ils prêts à augmenter leur facture énergétique pour réduire leur empreinte environnementale ? Et au delà, Y a-t-il d'autres contextes dans lesquels les consommateurs seraient prêts à payer plus cher leur énergie ?* Les travaux [81], [82], [83] et [84] se sont posés la question de cette propension à consommer de l'énergie renouvelable plus chère respectivement en Slovénie, en Ethiopie, en Italie, et en Chine. Ces études mettent également en avant les facteurs socio-économiques influençant cette acceptation. Ce qui en ressort est que le revenu, le niveau d'éducation, l'âge et les connaissances du milieu de l'énergie sont les principaux moteurs dans les changements de comportement liés à l'achat d'énergie. Ainsi, il apparaît qu'une volonté de déployer des systèmes d'ENR avec un management énergétique oblige les décideurs de rendre ces technologies abordables pour éviter de creuser les inégalités tout en accompagnant les projets par de la formation et de la pédagogie auprès des consommateurs.

Méthodologie de caractérisation de population

Plusieurs approches sont possibles pour caractériser une population. Une première approche pour expliquer et classer des comportements énergétiques repose sur des études socio-économiques. Par exemple, [85], va utiliser des données provenant des contextes irlandais et islandais couplées à un questionnaire reposant sur les préoccupations financières et environnementales des personnes interrogées pour expliquer les comportements énergétiques des foyers. Autre possibilité, regarder les comportements énergétiques en fonction des habitudes et de la perception de la notion de confort du foyer, comme proposé dans [86]. L'approche retenue dans les travaux de recherche précédant celui-ci, [29] se base plutôt sur la micro-économie et la sociologie. Le but est de définir des stratégies types de consommations en fonction des sensibilités des acteurs, pour en dégager ce qui s'appelle en sociologie des "idéaux types". L'idéal type est un outil méthodologique en sociologie qui sert de guide dans la construction d'hypothèses. C'est une construction intellectuelle d'un attribut exagéré et simplifié de l'objet considéré [87]. Ainsi, dans la construction d'idéal type, il n'y a

pas de volonté de retranscrire la réalité, mais plutôt d'élaborer des hypothèses pour l'étude d'un phénomène. Par exemple, considérer qu'un foyer va modifier ses comportements énergétiques dans l'unique but de réduire son empreinte environnementale constitue un idéal type. En effet, la réalité est plus complexe dans le sens où différents objectifs peuvent être poursuivis simultanément par un même objet. Considérer intégralement tous ces objectifs serait fastidieux, et ne considérer que la caractéristique principale de la motivation permet de réduire les stratégies énergétiques du foyer à une fonction d'objectif simple.

Résumé des profils retenus

Plusieurs études se sont penchées sur le sujet : les enquêtes, [88] définit 6 profils de consommateurs, [89] en définit 5, et [90] en définit 6 également. Les auteurs de [43], s'intéressent particulièrement aux motivations à participer à une communauté d'énergie et ont identifié 8 profils de motivations. En recoupant ces enquêtes, 5 profils de consommateurs avaient été établis dans les travaux [29]. Un sixième profil (voir "profils autonomes" ci dessous) peut être ajouté. Ces profils sont les suivants :

- Les économes, qui portent un intérêt à la réduction de leurs factures énergétiques.
- Les éco-sensibles, qui portent un intérêt à la réduction de leurs impacts environnementaux.
- Les technophiles, qui portent un très grand intérêt aux nouvelles technologies de l'information et de la communication. Leurs foyers sont largement équipés en appareils smart et ont donc une participation importante aux flexibilités.
- Les indifférents, qui n'ont pas vraiment de préférences particulières dans leur façon de consommer de l'énergie. Ils sont susceptibles de participer à des consommations invisibles comme celle du ballon d'eau chaude, mais ne seront pas plus engagés au delà.
- Les désengagés, qui participent pas à la gestion énergétique par méconnaissance, désintérêt ou rejet du système. Leurs consommations peuvent donc être considérées comme fixes, car ils ne seront pas du tout flexibles.

- Les autonomes, qui possèdent un moyen de production ou participent à une opération d'autoconsommation collective. Il porte un intérêt à consommer l'énergie la plus locale possible pour des raisons d'autonomie ou d'indépendance énergétique.

Les frontières de la méthodologie

Il est nécessaire de préciser, que les comportements individuels ont été uniquement présentés ici. En réalité, les dynamiques de groupes sont tout aussi importantes dans la définition du comportement individuel. Les résultats de [91] prouvent l'influence de l'apprentissage social dans l'augmentation de la participation à des opérations de management énergétique. [92] propose aussi une méthodologie pour trouver les consommateurs susceptibles d'influencer les autres consommateurs.

Ainsi, suivant l'échelle observée, il est possible de modéliser différemment les comportements. Selon [93], il existe trois grandes approches dans la compréhension de la relation entre des individus et leurs consommations d'énergie. Enfin, une habitude ou une préférence n'est pas une donnée statique et peut évoluer dans certaines circonstances. Il est important de comprendre l'effet d'échelle dans les SHS pour choisir le prisme de lecture adéquat à la situation sur lequel s'appuyer pour modéliser le facteur humain. La figure, 2.3, résume les différents domaines d'étude des SHS.

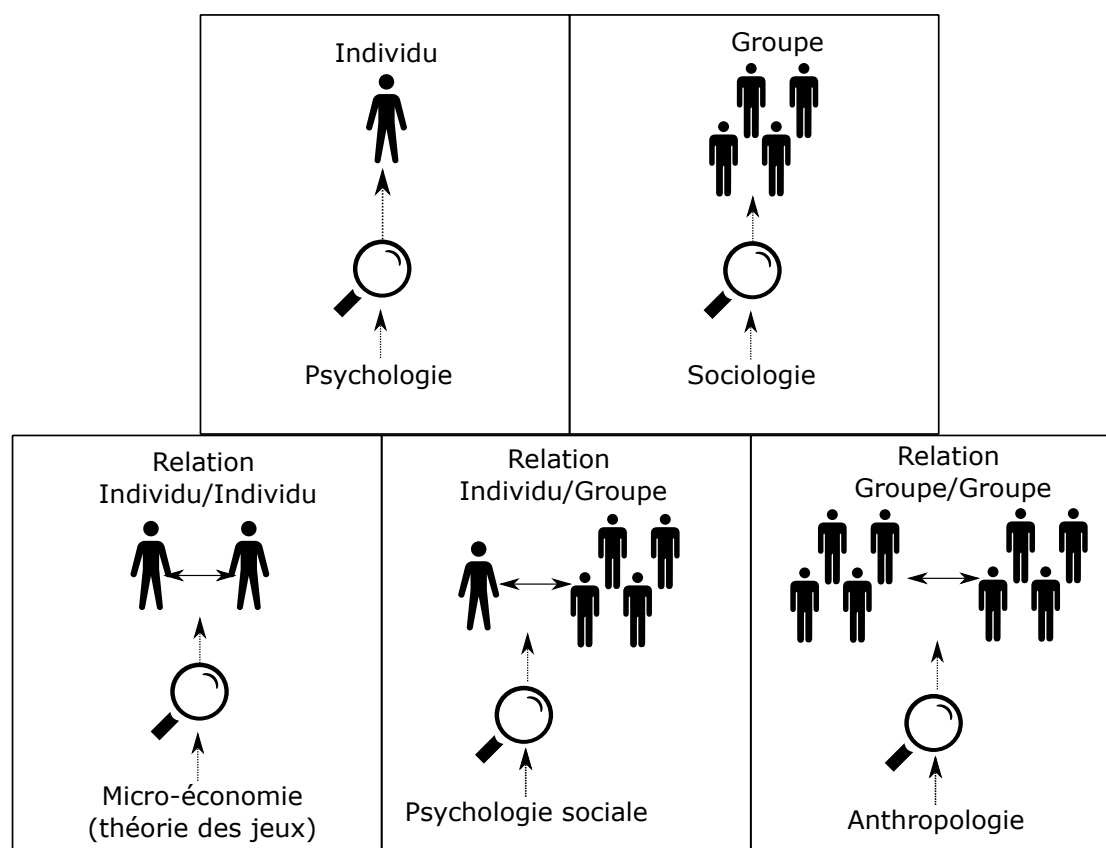


FIGURE 2.3 – Scope des différentes disciplines SHS

2.2.3 Le changement des comportements, un enjeu majeur de la transition énergétique

Au vu des enjeux de la transition énergétique, il est clair que miser uniquement sur des technologies semble insuffisant. L'efficacité énergétique (c'est-à-dire l'utilisation de moindre énergie pour un même service) est nécessaire, mais doit s'accompagner d'un changement intrinsèque de l'utilisation d'énergie. Les grands rapports scientifiques alertent pour la plupart sur la nécessité de se tourner vers plus de sobriété énergétique ([3],[14], [15], [17]). Les communautés d'énergie sont donc des expérimentations à taille humaine qui permettent de démocratiser les connaissances des systèmes énergétiques et de proposer des bonnes pratiques dans leur gestion. En effet, ramener les productions d'énergies au plus près des consommateurs leur permet de mieux comprendre les ordres

de grandeurs de l'énergie, et les impacts des consommations énergétiques en parallèle des productions. Ainsi, les auteurs de [94] ont soumis une enquête à 200 ménages possédant des systèmes photovoltaïques afin d'estimer comment l'acquisition de leur propre production a encouragé un changement dans leurs comportements énergétiques. L'étude souligne que les spécificités d'une installation photovoltaïque (telles que la possibilité d'afficher des données de consommation et de production) encouragent les propriétaires de systèmes solaires à modifier leur rapport à l'énergie et à l'environnement. De même, [95] a montré que le monitoring actif et l'intérêt porté aux technologies ont un impact positif sur les comportements de flexibilité. Cependant, [21] et [96] soulignent le risque d'un effet rebond¹ Un certain nombre d'études comportementales, résumées dans [97] et [98] mettent en avant les conditions nécessaires pour un changement radical de pratique dans les consommations énergétiques et sont souvent incorporées dans ce type de projet. Parmi celles-ci, il y a :

— Les interventions préalables :

- L'engagement des acteurs sur des réductions de consommations énergétiques et de leurs impacts environnementaux (par exemple contractuellement).
- La mise en place d'objectifs communs, voire des challenges pour stimuler la participation.
- La fourniture d'information aux acteurs sur l'impact de leurs consommations et sur l'importance de les réduire.

— Les stratégies conséquentielles :

- Les systèmes de récompenses : ils peuvent être de 2 natures différentes : une récompense économique qui encourage à porter une attention particulière à ses consommations ou une récompense en reconnaissance sociale.

1. Aussi appelé paradoxe de Jevons, l'effet rebond se produit lorsqu'un système gagne en efficacité. Appliqué à l'énergie, ce paradoxe met en avant que les gains énergétiques obtenus par une meilleure efficacité n'induisent pas nécessairement une baisse de consommation globale, mais qu'au contraire, une augmentation des consommations peut être observée. Ceci est en partie expliqué par la réponse à un besoin plus accessible qu'auparavant lié aux systèmes photovoltaïques, qui peut conduire à une augmentation de la consommation d'énergie des ménages.

- Établir des retours d'information sur les changements déjà amorcés par les acteurs et leurs impacts.

2.2.4 Les nouvelles organisations des marchés : les règles de la communauté

Comme expliqué auparavant, la construction du réseau électrique s'est faite autour d'une production centralisée qui alimentait directement les consommateurs. Ainsi, EDF produisait son électricité, l'acheminait sur les différentes poches de réseau et facturait les consommations à la fin. La décentralisation des moyens de production et l'ouverture du marché à la concurrence ont bouleversé les échanges économiques autour de l'énergie électrique. Les structures de communauté peuvent être assimilées à des marchés locaux de l'énergie, et différents modèles économiques sont référencés dans la littérature pour la gestion de ces structures :

- Les marchés de communauté (community based markets) [99], [100], [101] : Un acteur centralisé (community manager) du marché est chargé de coordonner l'ensemble des échanges au sein d'une communauté d'énergie. Celui-ci peut fixer lui-même les prix de l'électricité ou appliquer une clef de répartition de l'énergie préalablement établie contractuellement entre les participants. Chaque agent définit donc ses besoins de vendre ou d'acheter de l'énergie en fonction des prix fixés. Le community manager aura la charge de récupérer l'ensemble des stratégies individuelles pour organiser l'ensemble des flux (financiers et énergétiques) entre chaque participant. La présence du manager permet d'avoir un traitement équitable entre chaque acteur dans les différents échanges de la communauté. Cependant, l'aspect de la protection des données et de la vie privée est un frein à ce genre d'initiative, car chaque participant doit transmettre l'ensemble de ses stratégies au community manager.
- Les marchés Peer-to-peer (P2P) [102], [103], [104] : Dans ce type de structures, les acteurs de la communauté s'échangent de l'énergie entre eux sans passer par l'intermédiaire d'un agrégateur. L'ensemble des négociations autour des flux énergétiques se fait entre membres. L'avantage repose sur le

fait que les participants ont une totale liberté dans leurs échanges (chacun peut fixer les coûts d'achat, de vente et de consommation en négociant directement avec ses pairs). Cependant, cela nécessite des infrastructures de communications robustes, car tout le monde doit avoir la capacité de communiquer avec l'ensemble de la communauté. Si ce n'est pas le cas, cela pourrait déséquilibrer le marché, faute d'information sur celui-ci. L'équilibre du marché est aussi plus difficilement atteignable, car les phases de négociation (appelées market clearing) sont plus longues que sur un marché de communauté.

- Les marchés hybrides [105], [106] : Ces structures combinent deux niveaux distincts : un niveau d'échanges P2P où les GRD, des agents individuels et des gestionnaires de communauté échangent directement de l'énergie, et un niveau où les utilisateurs au sein des communautés effectuent des échanges avec des mécanismes de marché de communauté. Elles divisent le réseau de distribution en cellules pour faciliter les échanges. Cette approche mixte offre les avantages des deux catégories précédentes. Cependant, sa mise en pratique reste théorique et complexe, nécessitant une coordination difficile entre les acteurs individuels et les communautés d'énergie [107].

La figure 2.4 résume les structures des modèles économiques présentés. Ceux-ci rejoignent les méthodes de management de l'énergie présentées en 2.1.3. En effet, l'approche économique est souvent utilisée en SI et le prix de l'énergie est souvent considéré dans les fonctions objectifs des algorithmes d'optimisation. Une des particularités de ces travaux multidisciplinaires est d'explorer une méthodologie de gestion énergétique dans laquelle la question financière n'est pas l'unique objectif considéré.

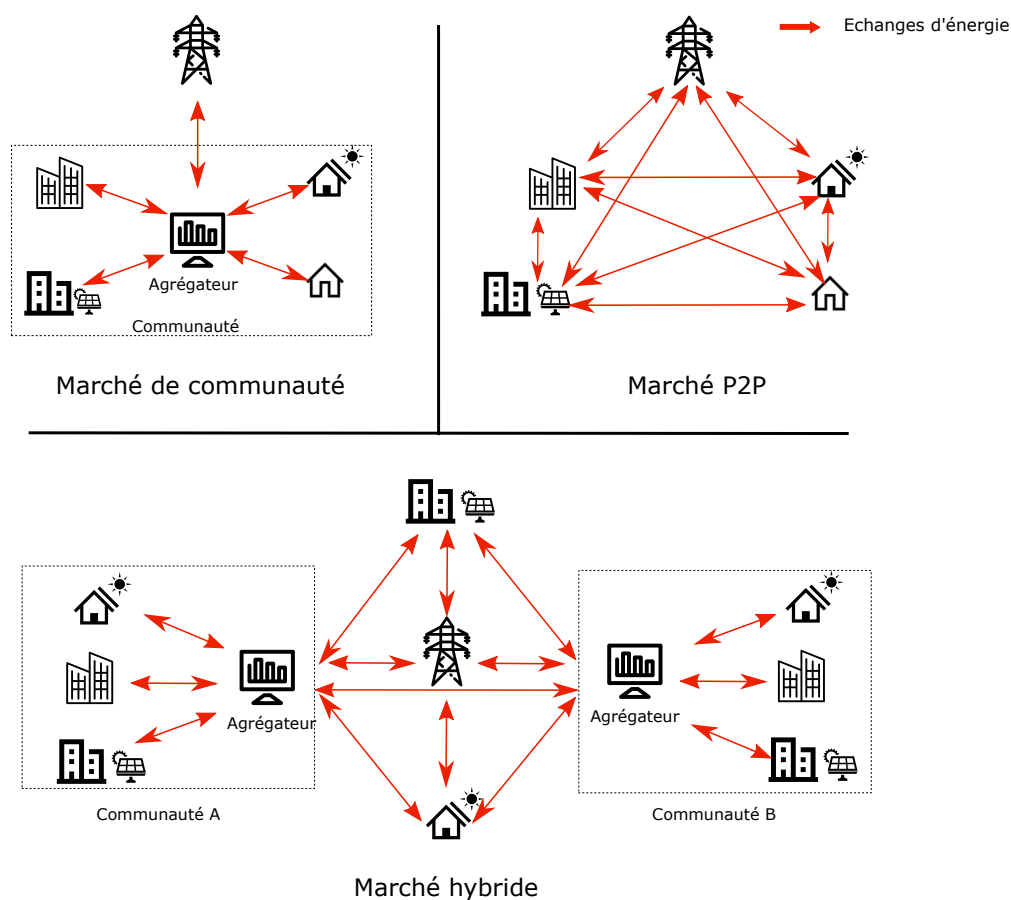


FIGURE 2.4 – Schémas des modèles économiques discutés

2.2.5 La théorie des jeux : la modélisation des interactions pour optimiser les consommations énergétiques

Généralités

Pour modéliser des interactions complexes entre participants, la théorie des jeux est l'un des piliers mathématiques dans la littérature. Elle repose sur la définition de stratégies individuelles qui permettront à un joueur de tirer le profit maximum d'un jeu. La construction du jeu est la première étape essentielle à considérer dans ce cadre, et pour cela, il existe différentes règles ou hypothèses à considérer suivant le contexte :

- Les jeux peuvent être simultanés ou séquentiels. Autrement dit, le déroulement

d'un tour de jeu se fait avec l'ensemble des participants jouant en même temps ou bien il existe un ordre précis pour jouer.

- L'accès à l'information est essentiel à connaître pour modéliser une stratégie individuelle. En effet, plus un joueur sera informé des autres stratégies possibles ou adoptées par les autres joueurs, plus il sera avantage. Ainsi, plusieurs degrés d'information sont possibles : Si l'ensemble des joueurs ont connaissance de l'ensemble des actions individuelles qu'ils peuvent entreprendre et de celles de tous les autres joueurs, que les gains possibles de chacune de ces actions sont connus et que les motivations des autres joueurs sont parfaitement définies, alors l'information est dite parfaite. Si l'une de ces contraintes n'est pas applicable, alors l'information est dite imparfaite. De plus, si l'ensemble des règles sont bien connues de l'ensemble des joueurs, alors l'information est considérée comme parfaite et complète. Enfin, si l'ensemble des joueurs ne connaît pas l'ensemble des règles, alors il faudra déterminer si les joueurs ont un degré de connaissances égal. On parlera alors d'information incomplète symétrique, ou si au contraire ils n'ont pas tous le même degré de connaissances, l'information est alors incomplète asymétrique. Ces critères sont particulièrement importants dans le cadre d'une gestion énergétique, car ils posent la question des infrastructures de télécommunications et de leur accès.

Il existe deux branches distinctes dans la théorie des jeux :

- Les jeux non-coopératifs : ce sont des modélisations mathématiques d'interactions individuelles dans lesquelles chaque joueur cherchera à maximiser son utilité personnelle en fonction des stratégies adverses. Ces jeux sont dits non coopératifs, car il n'y a pas de concertation des joueurs avant le tour de jeu. La plupart des jeux cherchent à prouver qu'il existe au moins un équilibre dans lequel chaque joueur ne pourra trouver de meilleures stratégies compte tenu des stratégies des autres joueurs. Autrement dit, au vu des décisions de tous, chacun ne pourra trouver qu'une seule solution optimale. Cet équilibre s'appelle l'équilibre de Nash.
- Les jeux coopératifs, quant à eux, modélisent les interactions entre joueurs dans un contexte où ceux-ci peuvent se concerter pour tirer un meilleur

profit de leur stratégie en s'alliant à d'autres joueurs. Il existe deux approches principales dans les jeux coopératifs :

- Les jeux de marchandage de Nash : Ces jeux servent à étudier les conditions sous lesquelles une partie des joueurs décide de s'allier et de former des coalitions. Ainsi, les gains individuels obtenus par la formation d'une coalition sont observés. Ces jeux permettent de déterminer les meilleures associations de joueurs possibles dans un jeu.
- Les jeux de coalitions canoniques : dans ces jeux, une grande coalition est formée. Les joueurs peuvent ensuite former des sous coalitions pour maximiser leur utilité sous cette grande coalition. Ici, la contribution d'un joueur dans le jeu est observée et des méthodologies de distribution de gains sont utilisées pour rémunérer les joueurs.

Les travaux au sein de l'équipe de recherche se sont jusqu'ici orientés vers des solutions basées sur les jeux non coopératifs. Dans les travaux concernant ce mémoire, les solutions de théorie des jeux et notamment des jeux canoniques seront explorées.

La théorie des jeux appliquée aux gestions d'énergie

Grâce à la caractéristique de modélisation de stratégie d'acteurs, la théorie des jeux est souvent utilisée pour répondre aux objectifs de management de réseaux énergétiques.

Dans [108], les auteurs font l'état des lieux des différentes contributions de la théorie des jeux à la gestion des smart grids et des micro-réseaux. Les jeux non coopératifs ont été largement utilisés pour modéliser les interactions liées aux échanges d'énergie au sein d'un micro-réseau [25] ou pour résoudre des problèmes d'optimisation liés à la gestion de l'énergie par la demande [29]. Outre le L2EP, la littérature regorge d'exemples de jeux non coopératifs appliqués à la gestion énergétique. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer [109], [110], et [111]. Dans ces travaux, les auteurs développent des stratégies de gestion énergétique basées sur l'équilibre de Nash, où les consommateurs répondent à un signal de prix de l'énergie pour maximiser leur utilité énergétique. Les résultats montrent dans

ces trois cas que l'atteinte d'un équilibre de Nash conduit à une augmentation de la satisfaction des consommateurs tout en permettant de soulager le réseau.

Les jeux coopératifs ont, quant à eux, été utilisés principalement pour des problèmes d'extension de réseau, notamment en ce qui concerne l'interconnexion de réseaux électriques [112]. Une autre application des jeux coopératifs a été l'étude des échanges d'énergie entre différents micro-réseaux sans recourir aux réseaux de transport [113]. Plus récemment, avec l'émergence du concept légal de communautés d'énergie, une approche de gestion énergétique prenant en compte les flexibilités a été développée, en utilisant des jeux coopératifs couplés à des modèles économiques Peer to Peer. Dans la plupart des articles traitant de ce sujet, les auteurs examinent les avantages obtenus par les acteurs lorsqu'ils coopèrent pour définir des stratégies d'échange, formant ainsi des coalitions. Parmi la littérature existante, nous pouvons citer [114], [26], et [115]. Dans [116], l'auteur propose également une optimisation de l'énergie via la théorie des jeux à deux niveaux. Au premier niveau, les participants se concertent pour former des coalitions de manière décentralisée. Les résultats de ces concertations sont ensuite centralisés avec un agrégateur qui redistribuera l'énergie entre les prosumers mais aussi entre les prosumers et les consommateurs via un jeu non coopératif.

Les limites de l'utilisation de la théorie des jeux dans les gestions de réseau d'énergie sont les mêmes que pour les DSM en général. C'est à dire, la protection des données, l'accès aux technologies et la robustesse des systèmes de communications. Les jeux collaboratifs apportent une autre contrainte : la taille des communautés étudiées. C'est pour cela qu'ils ont été moins déployés que les jeux non coopératifs dans ce contexte. En effet, plus il y a de participants, plus le temps de calcul augmente exponentiellement. Certains travaux ont essayé de pallier ce défaut, comme dans [117], où des techniques de partitionnement de données sont utilisées pour réduire le temps de calcul. Le problème est que les concepts utilisés voient leurs caractéristiques modifiées d'un point de vue mathématique de la théorie des jeux. Les résultats peuvent dévier de la philosophie originale du jeu portée par ces caractéristiques mathématiques (Voir Chapitre 4). Nous proposerons une méthode pour réduire le temps de calcul en Chapitre 4. Nous étudierons comment nous pouvons réadapter les concepts de la

théorie dans un contexte spécifique aux communautés d'énergie. Les déviations mathématiques seront discutées et les bénéfices/désavantages de la méthode pour une gestion d'énergie seront discutés.

2.3 Le contexte environnemental, moteur des travaux de recherche sur la transition énergétique

2.3.1 Les différents impacts environnementaux

Changement climatique et émissions de gaz à effet de serre

Le premier paramètre à considérer dans un contexte d'observation d'impact environnemental de la consommation d'énergie est son impact sur le changement climatique. Ce paramètre concerne les émissions de Gaz à effet de serre (GES), souvent simplifiées en émissions de CO_2 . Le secteur de l'électricité, responsable d'environ 40 % des émissions mondiales par sa génération au charbon, est au cœur de cette préoccupation. L'analyse des émissions de CO_2 représente déjà un challenge scientifique. En effet, la principale complexité du calcul de l'empreinte carbone d'un produit ou d'une solution réside dans sa dépendance à l'échelle de temps choisie dans son cycle de vie. Le "Greenhouse Gas Protocol" (GHG Protocol) [118], est un protocole international proposant un cadre pour mesurer, comptabiliser et gérer les émissions de gaz à effet de serre provenant des activités des secteurs privé et public élaboré par le World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) et le World Resources Institute (WRI). Il permet de fixer les méthodes de calcul et d'évaluation de l'impact sur le changement climatique d'un produit ou service. Le GHG Protocol propose 3 scope d'évaluation des émissions de GES :

- Le Scope 1 : Ce scope répertorie les émissions directes d'un produit ou service. Dans le contexte de la gestion énergétique, l'outil Eco2mix du gestionnaire du réseau de transport français Réseau de transport d'électricité (RTE) [119] est un bon exemple de l'évaluation des émissions de GES. Les émissions directes de CO_2 sont dans ce contexte un indicateur pertinent, car elles sont censées représenter l'état du réseau à un instant précis.

- Le Scope 2 : Ce Scope répertorie les émissions indirectes liées à l'énergie, provenant de l'électricité, de la vapeur, de la chaleur et du refroidissement achetés ou acquis. Dans le cas de l'impact de consommation électrique, ce Scope est moins utilisé, car l'impact d'un kWh consommé est souvent rapporté au kWh produit, et donc le Scope 2 se mélange dans ce cas au Scope 1, puisque les émissions associées correspondent à celles directement émises lors de la génération de ce kWh.
- Le Scope 3 : Ce Scope répertorie l'ensemble des émissions directes et indirectes depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie. L'Agence de la transition écologique (ADEME) propose une base de données carbone basée sur le Scope 3 [120]. La méthode d'Analyse sur Cycle de Vie (ACV), qui prend en compte la fabrication d'un produit et son impact en fin de vie, est également basée sur ce Scope.

Quand les GES sont évoqués dans la presse ou la littérature scientifique (hors champs climatologie), le plus souvent, il est question d'émission de CO_2 . Le raccourci peut être expliqué par l'indicateur du pouvoir de réchauffement global d'un gaz dont l'unité est exprimée en CO_2 équivalent (CO_{2eq}). Le CO_2 étant le GES majoritairement responsable du réchauffement climatique, il sert de référence sur la contribution d'un gaz au réchauffement climatique. C'est pour cela que la référence pour estimer l'impact d'un gaz sur l'effet de serre est le CO_2 . Contrairement au CO_2 qui est stable dans l'atmosphère et a besoin de puits pour le stocker, car il ne se dégrade pas naturellement, d'autres GES tels que le méthane (CH_4) et les oxydes d'azote (NO_x) présentent des cycles et des durées de vie atmosphériques différents, ajoutant une complexité supplémentaire à la compréhension de leur impact environnemental. Le pouvoir de réchauffement global (Global Warming Potential (GWP)) est un indice permettant de mesurer la contribution potentielle d'un gaz à effet de serre au réchauffement climatique sur une période spécifiée, généralement sur 100 ans, par rapport au dioxyde de carbone (CO_2).

Le GWP d'un gaz est le rapport entre l'effet de ce gaz sur le réchauffement climatique sur une période donnée et celui du CO_2 sur la même période. Ainsi, un GWP de 20 pour un gaz signifie qu'il a une capacité à retenir la chaleur dans

l'atmosphère 20 fois plus grande que celle du CO_2 sur une période de 100 ans.

La limite du GWP réside dans le fait que les gaz à effet de serre n'ont pas la même durée de vie. Ainsi, suivant l'échelle de temps considérée, un gaz à effet de serre sera plus ou moins impactant en rapport avec le CO_2 . Le GWP est souvent utilisé pour convertir les émissions de différents gaz en une équivalence en CO_2 afin de simplifier la communication des impacts climatiques.

La discussion de ce présent paragraphe permet de mettre en avant la difficulté d'estimer l'impact d'un gaz à effet de serre sur le changement climatique. Premièrement, suivant les objectifs recherchés, les périmètres d'inventaire différents, faut-il considérer dans l'étude les émissions passées et futures de la consommation d'un kWh d'énergie? Quels autres gaz à effet de serre doivent être inventoriés, et quelle période de comparaison est choisie pour estimer son impact? Toutes ces questions d'avant étude sont également confrontées à un inventaire fastidieux à effectuer en amont. Jusqu'où décomposer les processus de fabrication et de fin de vie d'un produit. Le tout dans un contexte d'économie de marché dans laquelle la mise à disposition d'informations sur un processus industriel peut se révéler être un inconvénient marchand. Toutes ces hypothèses doivent être faites et énoncées clairement lorsque l'impact sur le changement climatique est quantifié. Le problème se complexifie encore plus si nous nous intéressons aux autres impacts environnementaux.

Les autres impacts environnementaux

Tenter de résoudre le problème du changement climatique peut impacter d'autres paramètres environnementaux. Les discussions autour de l'extraction des métaux pour les énergies renouvelables et les réseaux intelligents illustrent bien la problématique plus globale de la transition énergétique. Dans [121], les auteurs estiment les émissions de GES dues à l'extraction du cuivre et proposent des solutions pour atténuer l'impact du secteur minier, révélant ainsi les débats en cours sur la croissance du secteur. L'épuisement des ressources est un autre indicateur de l'impact des activités humaines sur l'environnement. Cette question se pose pour la transition énergétique, l'étude de RTE [122] évoque les incertitudes sur l'approvisionnement en métaux nécessaires à la transition énergétique

en France. Cette question anime actuellement beaucoup de débats autour du déploiement d'ENR et des Véhicule Électrique (VE). Selon le rapport [123], la question des ressources n'est pas un problème de stock mais de flux. La question n'est pas vraiment de savoir s'il y a suffisamment de ressources, mais plutôt de savoir si l'on est capable d'extraire les ressources à temps, compte tenu de la croissance de la demande pour une transition rapide. Au-delà de la disponibilité des ressources, la prise en compte des impacts plus larges d'une activité est essentielle pour les stratégies de développement de nos sociétés. L'exploitation minière peut également nuire considérablement à l'environnement et à la santé humaine, comme en témoigne la rupture du barrage minier de Fundão au Brésil en 2015 [124].

Pour une évaluation plus globale de l'impact sur l'environnement, [125] identifie neuf frontières planétaires. Ce sont des seuils au-delà desquels le système terrestre pourrait se déstabiliser. En franchissant ces limites, la période de stabilité de l'Holocène² pourrait être compromise, affectant le développement des sociétés humaines. Au delà du franchissement d'une limite, qui a des conséquences importantes sur la stabilité du système Terre, la principale problématique est que le dépassement d'une limite peut en affecter une autre. Par exemple, le franchissement de la limite du changement du système terrestre pourrait affecter l'intégrité de la biosphère. En ce qui concerne la transition énergétique, [126] présente l'impact de la croissance du secteur minier sur la biodiversité. La limite de l'intégrité de la biosphère pourrait, à son tour, affecter la limite du changement climatique en réduisant le puits de carbone de la biosphère, comme l'explique le rapport du GIEC "The physical sciences basis, chapter 5" [1]. Il est essentiel d'examiner l'impact de la transition énergétique sur ces limites, sachant que six des neuf limites ont déjà été franchies [127].

Comment faire des choix sur la base de paramètres environnementaux ?

Il existe différentes méthodologies pour évaluer l'impact environnemental. L'analyse du cycle de vie ACV est une méthodologie permettant de considérer

2. L'Holocène est le nom de l'ère géologique qui représente les 11 000 dernières années. Correspond à la dernière partie de l'ère quaternaire période la plus récente dans l'échelle des temps géologiques.

l'ensemble des impacts d'un produit ou d'un système de l'extraction de matières premières jusqu'à la fin de vie (destruction, recyclage,...). La méthodologie est encadrée par les normes ISO 14040 :2006 et ISO 14044 :2006. L'objectif principal de l'ACV est de quantifier les impacts environnementaux associés à chaque étape du cycle de vie afin d'identifier les opportunités d'amélioration et de promouvoir la durabilité environnementale des produits et des processus. Elle se fait souvent par comparaison de plusieurs solutions répondant aux mêmes besoins pour orienter les décisions sur leur développement afin de limiter l'impact environnemental. Dans le domaine du génie électrique, l'ACV est souvent utilisée pour quantifier l'impact environnemental des technologies de la transition. Cependant, les indicateurs observés se cantonnent souvent aux impacts climatiques ou aux consommations d'énergie primaire [128], [129],[130]. Il convient toutefois de garder à l'esprit les limites de cette approche :

- C'est une méthode très exhaustive qui nécessite de connaître toute la chaîne du cycle de vie d'un produit. Pour avoir une ACV complètement fiable, il faut donc avoir directement accès à l'ensemble des composants d'un système et connaître l'ensemble des processus industriels sur le cycle de vie du système. Il est souvent nécessaire de poser des hypothèses par manque d'accès à ces informations.
- La méthode ACV quantifie les impacts dans un contexte spécifique, ce qui la rend adaptée aux décisions à court terme. Il s'agit d'un outil statique qui ne permet pas d'effectuer une évaluation dynamique dans des scénarios à moyen et long termes. En effet, la méthodologie repose sur une analyse des différents process industriels utilisés à chaque étape du cycle de vie du produit. Il n'est pas possible d'anticiper l'évolution de tous ces process grâce à l'ACV (Par exemple l'électrification du transport, l'évolution des techniques d'extraction de matière première, les process industriels...)

Pour explorer des scénarios afin d'orienter des décisions de long terme, les modèles d'évaluation intégrés (ou Integrated Assessment Model (IAM)) sont majoritairement utilisés. Différents modèles sont présentés dans [131], où les auteurs proposent une revue de la littérature sur le sujet. Certains de ces modèles sont conçus de façon multidisciplinaire, et permettent d'avoir une

représentation des causes et des effets des activités humaines sur le système climatique. Ces outils permettent notamment de créer des scénarios énergétiques qui semblent être probables afin d'évaluer les risques associés à certains chemins de développement. Ces modèles sont utilisés par les pouvoirs publics et les différentes agences de conseil autour du climat. Il est important de noter qu'il ne s'agit que de modèles mathématiques basés sur des hypothèses connues à un moment donné, mais l'intégration de l'ensemble des impacts environnementaux est très difficile, car il existe des boucles de rétroaction. Les résultats de ces scénarios ne sont donc pas des prédictions pour le futur, mais plutôt des projections à partir d'hypothèses de départ. Ces boucles sont sources d'incertitude, car elles n'ont pas encore été observées en raison de l'évolution constante du système terrestre.

La quantification de l'empreinte environnementale peut s'avérer difficile et nécessite une expertise dans différentes disciplines (telles que la chimie du climat, la chimie de l'eau et du sol, la biologie, ...). L'évaluation de l'impact environnemental nécessite une collaboration entre des experts de tous les domaines scientifiques. C'est pourquoi le travail du GIEC est l'une des contributions scientifiques les plus importantes de l'Histoire. L'étude des impacts d'une activité économique est, d'une part, très difficile et exhaustive, mais d'autre part, elle est nécessaire pour limiter les dommages causés au système terrestre. C'est pourquoi les solutions développées pour résoudre un problème environnemental spécifique doivent vérifier si elles ne déstabilisent pas un autre indicateur de stabilité environnementale.

2.3.2 La question environnementale et les smart grid

La transition énergétique est aujourd'hui principalement portée par des questions environnementales. Il est devenu nécessaire de faire évoluer les systèmes énergétiques vers de la production d'énergie dite renouvelable, notamment pour des considérations climatiques ou de disponibilité de ressources. La recherche autour de l'évolution des réseaux électriques s'est donc développée autour des questions d'intégrations de systèmes de production intermittente et plus récemment de nouvelles charges telles les véhicules électriques (évolution

des transports pour réduire la dépendance de nos sociétés aux énergies fossiles). Ainsi, malgré l'objectif du déploiement de smart grid semble consensuel : Compte tenu de la situation environnementale actuelle et de l'impact significatif du secteur de l'énergie sur la planète, il est de plus en plus nécessaire d'intégrer les sources d'énergie renouvelables dans le mix électrique. Cependant, ces technologies nécessitent la mise en œuvre de nouveaux moyens de gestion de la demande. La réponse vient des réseaux intelligents qui permettent d'innover dans les stratégies de gestion de l'énergie qui répondent à ces défis. Malgré cela, les objectifs d'optimisation affichés dans la littérature sont très différents. Parmi ces objectifs, nous pouvons retrouver par fréquence d'apparition :

- Le prix : C'est la variable la plus simple, la plus significative et directe dans les relations entre parties prenantes d'un système de management énergétique. Il est admis qu'il guide les choix des consommateurs et qu'il permet de mieux réguler l'intermittence liée à l'intégration d'ENR. Ainsi, nous pouvons retrouver différentes représentations de ces objectifs : diminuer le tarif de l'énergie [132], maximiser le profit d'un acteur [133], baisser le prix pour la communauté [134], réduire les coûts de maintenance [135], réduire les coûts d'effacement [136].
- Le confort de l'utilisateur : Il s'agit de planifier les équipements au plus près des souhaits de l'utilisateur, de maintenir la température du bâtiment dans une fourchette acceptable [137], de charger le VE à une certaine capacité à un moment choisi [138], de respecter les préférences de l'utilisateur en termes de source d'électricité [139] ou de temps d'utilisation de leurs appareils [140].
- Les objectifs réseau : Il s'agit de lisser la courbe de charge et de réduire les pics ainsi que les fluctuations imprévisibles. La mesure la plus utilisée est le rapport entre les pointes et la moyenne (PAR), présenté par exemple dans [141].
- Une utilisation optimisée de l'énergie : Il s'agit de travailler sur l'efficacité énergétique des infrastructures de communication [142], ou sur la réduction des pertes [141, 143].
- L'intégration d'ENR : Ce sont des objectifs qui interviennent dans le cadre

de la construction de communautés d'énergie. Dans ces contextes, les réseaux intelligents permettent d'augmenter le taux d'autoconsommation d'énergie produite localement. Par exemple, dans [144], un système intelligent de gestion des batteries est proposé, résultant en une réduction de 25 à 30% d'énergie injectée sur le réseau.

Et l'objectif environnemental dans tout cela ? Dans l'ensemble de la revue de littérature effectuée, l'objectif affiché de réduction d'impact environnemental se place en quatrième position dans la liste ci dessus. L'impact étudié se limite la plupart du temps aux émissions de GES, les méthodologies reposent sur les contenus en CO_{2eq} de l'énergie consommée en fonction de leur origine (charbon, gaz, nucléaire, renouvelable..). L'optimisation des flux d'énergies sous cette contrainte permet de réduire les émissions de GES comme présenté dans [145]. Pour aller plus loin que le CO_2 , la même méthode de réduction des émissions peut être étendue à d'autres GES : par exemple, [146] inclut CO_2, SO_2, NO_2 pour chaque kWh provenant du réseau et de chaque système de production distribué, et atteint une réduction de ces GES entre 13 et 19%. La limite de ces approches est que le contenu moyen en GES de l'électricité du réseau n'est pas représentatif de l'impact en temps réel de l'électricité consommée. Un moyen de se rapprocher de la réalité est proposé par les auteurs de [147] qui utilisent la teneur marginale en GES de l'électricité pour tenir compte plus précisément de l'effet réel de la production d'énergie à un moment donné de la journée, et parviennent à une diminution de 6% des émissions de GES pendant la charge de véhicules électriques.

La méthode ACV est rarement utilisée dans la littérature. Lorsque la méthodologie est employée, elle est souvent utilisée pour quantifier l'impact sur le changement climatique (donc les émissions de GES) comme proposé dans [145]. Il existe cependant de rares études allant au delà des émissions de GES, comme dans une étude menée dans le contexte finlandais [148], où 18 indicateurs environnementaux sont pris en compte. Cette étude conclut notamment qu'un déploiement important de la technologie de communication pourrait avoir un effet contre-productif, principalement en raison de la consommation élevée d'électricité associée au réseau de capteurs, au système d'automatisation et aux appareils informatiques. De plus, les résultats ont démontré une corrélation directe entre

le nombre d'habitants d'un foyer et l'impact environnemental de la domotique. Dans le pire des cas, un ménage composé d'une seule personne a vu son impact environnemental augmenter de 15%, tandis qu'un ménage composé de cinq personnes a connu une augmentation de 3 %. De plus, l'étude souligne que les transferts d'impact de ces technologies doivent être discutés. Le même constat est fait dans les études [149],[150], [151] dans des contextes portugais, danois et espagnol. Toutes ces études préviennent que les gains sur le changement climatique attendus se répercutent sur d'autres paramètres environnementaux. Il n'est pas question ici de définir ce qu'est une bonne solution ou non, mais de donner l'information la plus précise possible pour orienter des décisions éclairées, et c'est pour cela que la méthodologie de l'ACV est intéressante et trop peu souvent utilisée. Constat qui avait déjà été établi en 2013 et 2014 par [152] et [153] qui questionnent le retour positif des HEMS et des Net Zero Energy Building sur l'environnement.

En conclusion, malgré un objectif consensuel de réduction d'impact environnemental, une revue de littérature prouve que cet objectif est minoritairement représenté dans les objectifs affichés. La raison étant sans doute qu'il est communément admis qu'un système permettant d'augmenter la consommation d'ENR est forcément positif d'un point de vue environnemental. Les quelques études qui quantifient les bénéfices de ces solutions ne se concentrent que sur les émissions de GES et souvent uniquement dans le cadre du scope 1. Celles-ci prouvent effectivement que des gains sont observés. Mais lorsque l'attention est portée sur un plus large panel d'impact, il est souvent observé que ces diminutions se répercutent sur d'autres facteurs environnementaux. L'impact du changement climatique est prioritaire dans le contexte actuel, mais il est nécessaire de connaître tous les risques environnementaux associés à une décision pour ne pas juste décider de stratégie de "pansement". La problématique réside surtout dans un manque de méthodologie précise et consensuelle sur l'étude d'impacts environnementaux dans le cadre des travaux de recherche sur les systèmes de management énergétique [154]. Enfin, il est intéressant de noter que les travaux quantifiant l'impact de l'énergie consommée se résument à une quantification du contenu CO_2 de l'énergie transitant sur le réseau. Or les travaux de recherche concernent la transformation des réseaux de transport et de dis-

tribution d'électricité. Le déploiement de micro réseaux au sein de ceux-ci va forcément impacter l'ensemble de la chaîne. Le dimensionnement complet de ces réseaux va donc être affecté et l'impact environnemental associé également. Or, l'impact environnemental de ces réseaux n'est jamais inclus dans le contenu CO_2 de l'énergie transitant sur celui-ci, bien que le kWh final consommé ait bien transité sur une partie de la chaîne d'approvisionnement. Prenons l'exemple de l'autoconsommation, celle-ci pourrait permettre, dans un premier cas, de diminuer les infrastructures réseau, car moins d'énergie circulerait dessus. Ce qui permettrait de diminuer l'impact environnemental global de l'énergie transitant sur celui-ci. Si au contraire nous posons l'hypothèse que le réseau doit rester tel qu'il a été conçu pour conserver une continuité d'approvisionnement dans n'importe quelle situation, alors l'installation de centrales ENR à but d'autoconsommation va inévitablement faire augmenter l'impact de l'énergie qui transite sur les réseaux de transports. Leur dimensionnement resterait le même pour une moindre quantité d'énergie circulant dessus, et ainsi la proportion de l'impact du réseau sur l'énergie qui transite sera plus grande.

2.4 Conclusion

La transition énergétique est au cœur de nombreuses discussions, car l'enjeu sociétal qu'elle représente est le plus gros challenge de notre temps étant donné la globalité du problème environnemental. Les chercheurs en SI innovent et proposent des solutions techniques et technologiques. L'amélioration des rendements des technologies de stockage et de déploiement d'ENR permet de répondre aux questions de la production d'énergie renouvelable et d'efficacité énergétique. L'émergence et l'industrialisation des TIC permet d'accélérer tout ce processus. D'un autre côté, les chercheurs en SHS réinventent les organisations autour des réseaux électriques. Que ce soit légalement avec les structures de communautés d'énergie ou scientifiquement en proposant de nouvelles méthodologies d'échanges d'énergie. L'étude des comportements de groupe et individuel prend une place de plus en plus importante dans les débats, car l'humain n'est pas uniquement un facteur externe à la technologie qui perturberait son efficacité, mais fait partie intégrante de l'environnement de la gestion

énergétique. Il est donc nécessaire de considérer l'humain dans la recherche autour des managements énergétiques, d'autant plus que la décentralisation des moyens de production apporte de nouvelles perspectives et d'opportunités de recherche dans le domaine. Cependant, la complexité du problème amène chaque spécialiste à étudier de plus en plus précisément le sujet selon le prisme de son expertise. Il est nécessaire de rester vigilant sur les réels objectifs fondamentaux de l'ensemble de ces travaux. La motivation intrinsèque est celle de l'environnement, et aujourd'hui, aucune méthodologie spécifique pour estimer l'impact environnemental des évolutions des réseaux électriques n'a clairement été proposée. Les méthodologies existantes et appliquées dans d'autres domaines sont également sous utilisées. Ainsi, l'intérêt de nos travaux est d'essayer de créer des passerelles entre les différentes visions présentées par des disciplines issues de SI et de SHS. Il existe certainement de nombreux chemins à emprunter dans la voie de l'interdisciplinarité et notre méthode de travail est également une invitation à l'ensemble de ces disciplines à collaborer étroitement entre elles, sans oublier l'enjeu et les objectifs majeurs à poursuivre pour la pérennité de nos sociétés. Ce chapitre a permis de balayer l'ensemble des champs d'études impliqués dans les travaux de recherche présentés dans ce mémoire. L'étendue du sujet est large et des choix quant à l'orientation des travaux ont dû être faits et seront présentés par la suite. Les revues de littératures sur chacune des disciplines, encadrant le sujet, proposées dans ce chapitre permettront de mieux comprendre les directions et les hypothèses prises dans la construction de la méthodologie proposée dans cette thèse.

Deuxième partie

Travaux réalisés

Méthode d'optimisation et intérêts collectifs

Sommaire du présent chapitre

Introduction	64
3.1 Construction de la communauté d'énergie	65
3.1.1 Simulation des données énergétiques	65
3.1.2 Introduction de profils sociologiques	73
3.2 Prix de l'énergie	74
3.3 Méthodologie de prise en compte des impacts environne- mentaux	76
3.3.1 Choix de la méthode ACV	76
3.3.2 Application de l'ACV	79
3.3.3 ACV de l'électricité délivrée en milieu résidentiel . .	81
3.3.4 ACV des appareils de flexibilité	89
3.4 Processus d'optimisation	92
3.4.1 Approche globale	92
3.4.2 La flexibilité, le paramètre d'optimisation	93
3.4.3 Méthode d'optimisation retenue	96
3.4.4 Première Étape : Optimisations individuelles	99

3.4.5 Deuxième Étape : Optimisation collective	100
3.5 Les bénéfices d'une gestion de l'énergie collective	100
3.5.1 La gestion énergétique est-elle bénéfique d'un point de vue environnemental?	101
3.5.2 Répondre aux problématiques techniques : l'influence de la production	104
3.5.3 L'influence des sensibilités individuelles des foyers .	113
3.6 Conclusion du chapitre	124

Introduction

L'originalité de ce travail se trouve dans l'approche multi-disciplinaire de la gestion énergétique. L'objectif est de proposer une nouvelle méthode de gestion énergétique adaptée à une communauté d'énergie en considérant des hypothèses des Sciences de l'Ingénieur (SI) et des Sciences Humaines et Sociales (SHS). Comme discuté en 2.3.2, l'objectif sous-entendu du changement de paradigme dans la gestion des réseaux électriques est leur adaptation au contexte environnemental. Or, cet objectif n'est pas toujours clairement énoncé dans la littérature, et le manque de méthodologie précise d'évaluation d'impact environnemental ne permet pas d'évaluer correctement les avantages des supervisions énergétiques sur ce point. Une proposition méthodologique d'évaluation d'impact environnemental est également un objectif important de ce travail.

Les données nécessaires au développement de la méthodologie étant difficiles d'accès pour des raisons de vie privée et d'un nombre d'expérimentations en contexte réel limité, l'ensemble des variables sont simulées. La communauté d'énergie étudiée sera donc entièrement construite et simulée à partir d'hypothèses provenant du Chapitre 2. Ce chapitre aura une double vocation :

- Présenter les différentes hypothèses retenues parmi l'ensemble des possibilités présentées au chapitre précédent pour la construction de la communauté d'énergie étudiée et pour les méthodes d'optimisation énergétique.
- Prouver l'intérêt d'une gestion collective de l'énergie au sein d'une communauté dans le contexte des hypothèses retenues.

Ce chapitre se décomposera comme ceci :

1. La modélisation du contexte énergétique de la communauté
2. La présentation des hypothèses de coûts et de facturation de l'énergie au sein de la communauté
3. La présentation de la méthodologie d'étude d'impact environnemental
4. La méthodologie d'optimisation retenue
5. Test de la gestion suivant différents scénarios avec prise en compte de différentes sensibilités d'acteurs.

3.1 Construction de la communauté d'énergie

3.1.1 Simulation des données énergétiques

Les consommations "traditionnelles" de foyer

Aucune donnée réelle n'étant accessible dans le cadre de ces travaux de recherche, il a fallu construire une communauté d'énergie virtuelle dans laquelle les données de consommations sont simulées. Pour tester l'efficacité de la méthodologie du travail, il est nécessaire de générer des données les plus réalistes au contexte dans lequel est menée l'étude. Il existe plusieurs méthodes pour générer ces données :

- Utiliser une approche de type ascendant. Il s'agit de créer des données très fines d'appareils composant les ménages, de les répartir statistiquement au sein d'une population et de les additionner pour créer une courbe de charge globale. L'avantage principal de cette méthode est la prise en compte des caractéristiques énergétiques spécifiques de chaque appareil qui permet une estimation précise des consommations. Cependant, pour une précision optimale une base de donnée exhaustive est nécessaire.
- Utiliser une approche de type descendant. Il s'agit ici de partir de courbes de charge totale et de les décomposer pour en déduire des données de consommation plus fines au niveau de foyers ou d'appareils. L'avantage est

de considérer des consommations énergétiques globales observées en conditions réelles. Les consommations des appareils spécifiques sont cependant moins précises.

- Utiliser une approche hybride. Il s'agit d'une méthode intermédiaire entre les deux autres méthodes.

Le choix s'est immédiatement tourné sur le modèle CREST [155]. C'est un modèle de type ascendant. Il a été utilisé dans ces travaux car il s'était montré efficace dans de précédents travaux du laboratoire. En effet la précision des données obtenues par le modèle sont intéressantes à exploiter dans ces travaux de recherche. La justification du choix de ce modèle est présentée dans le chapitre 3 de la thèse [29]. En se basant sur des données statistiques sur la pénétration des équipements et leurs puissances individuelles, ainsi que sur des données statistiques sur les habitudes d'occupation, le modèle reconstruit les consommations types d'un foyer. Le modèle a été reparamétré pour être plus représentatif du contexte actuel. Étant initialement conçu pour simuler les consommations des bâtiments connectés au réseau électrique britannique, des ajustements sont nécessaires pour rendre les consommations représentatives du contexte énergétique français.

Il est considéré ici que l'eau chaude sanitaire est fournie grâce à un système de Ballon d'Eau Chaude (BEC). L'intérêt est de créer une communauté dont l'écart de flexibilité est relatif, et se fera principalement par l'attribution ou non de Véhicule Électrique (VE). En effet, si les moyens de flexibilité du foyer sont trop limités, alors ses possibilités d'engagement dans la communauté sont restreintes. Le paramétrage concernant la répartition des autres appareils au sein de la communauté est basé sur les données de l'INSEE provenant des enquêtes EPCV (Enquête Permanente sur les Conditions de Vie) et SRCV (Statistiques sur les Ressources et les Conditions de Vie) qui détaillent les taux d'équipements des foyers [156]. De même, le nombre d'occupants des foyers est dérivé de l'enquête de l'INSEE sur la taille et la composition des ménages [157]. Les tableaux 3.1 et 3.2 résument les données statistiques introduites dans le modèle CREST. Le tableau 3.4 résume quant à lui les puissances nominales et consommations annuelles des appareils pris en compte par le modèle CREST.

Foyer	ECS	Chauffage	Répartition
Type 1	Non-élec	Non-élec	0%
Type 2	Elec	Non-élec	14%
Type 3	Elec	Elec	86%

TABLEAU 3.1 – Répartition des moyens de chauffage des foyers

Appareils	Taux de pénétration (%)
Réfrigérateur	99.8
Congélateur armoire	91.9
Téléphone	84.7
Hi-fi	54
Aspirateur	90
PC	81.1
TV1	96.3
TV2	44
Lecteur DVD	69.9
Décodeur	83.8
Four micro-ondes	89.3
Lave-vaisselle	61.4
Sèche linge	30.5
Lave-linge	96.4
BEC	100

TABLEAU 3.2 – Taux de pénétration des équipements dans les foyers

Nombre de personnes	1	2	3	4	5	6 ou plus	total
Répartition	36.7%	32.6%	13.6%	11.4%	4.1%	1.6%	100%

TABLEAU 3.3 – Répartition du nombre d'occupants par foyer

Appareils	Pnom[W]	Consommation moyenne[kWh/an]
Congélateur Coffre	190	271.1
Réfrigérateur-congélateur	190	386
Réfrigérateur	110	201.8
Congélateur armoire	155	354
Répondeur	1	8.76
Lecteur CD	15	33.2
Réveil	2	17.52
Téléphone	1	8.7
Hi-fi	100	88.7
Fer à repasser	1000	17.7
Aspirateur	2000	73.5
Fax	37	29.7
PC	141	348.6
Imprimante	335	49.5
TV1	124	241.8
TV2	124	241.8
TV3	124	241.8
Lecteur DVD	34	73.7
Décodeur	27	152.4
Plaques de cuisson	2400	276.1
Four	2125	236.1
Four micro-ondes	1250	76.5
Bouilloire	2000	160.6
Petit électroménager de cuisine	1000	32.1
Lave-vaisselle	1131	163
Sèche linge	1500	200
Lave-linge	406	92
Lave et sèche Linge	792	520.1
BEC	3000	2684.9
Chauffe eau inst	3000	1802.1
Chauffe eau inst douche	9000	130.6
Éclairage	-	715

TABLEAU 3.4 – Appareils considérés dans le modèle CREST et leur puissance nominale

Ajout des consommations de Véhicules Électriques (VE)

Pour se rapprocher des tendances qui se dessinent au niveau de la mobilité électrique, des consommations liées aux véhicules électriques ont été implantées. La croissance du nombre de véhicules électriques représente à la fois une contrainte dans le dimensionnement des réseaux, par l'augmentation des appels de puissance qu'elle provoque, et une opportunité de gestion de ceux-ci grâce à la grande flexibilité que les VE peuvent apporter. La charge d'un véhicule électrique est complexe à modéliser et est précisément étudiée dans de nombreux travaux. Les auteurs de [158] présentent l'ensemble des techniques et technologies permettant la recharge de VE, et ceux de [159] font une revue de littérature sur les méthodes de planification de charges de VE dans un cadre de gestion des réseaux de distribution. De nombreuses autres approches spécifiques sont possibles pour modéliser la planification de charges de véhicules électriques. [160] présente par exemple une revue de littérature sur la planification de charges de VE grâce à des technologies de machine learning. Une approche intéressante de cette planification provient d'études comme celles proposées dans [161, 162, 163] dans lesquelles les solutions proposées sont multidisciplinaires et prennent en compte les habitudes et les comportements liés à l'utilisation d'un VE.

L'intérêt ici n'était pas de proposer une méthodologie précise de modélisation du comportement de la charge de VE ni une méthodologie spécifique de programmation de ceux-ci. Les VE sont considérés dans ces travaux comme des appareils flexibles, au même titre que les autres appareils décalables dans le temps. Ainsi, la modélisation de leur consommation a été simplifiée. Premièrement, la consommation énergétique au km dépendant du type de modèle de véhicule, deux modèles de véhicules ont été considérés. Ceux-ci ont été choisis en fonction du nombre d'immatriculations et de ventes de ces modèles en France depuis 2016 [164]. Les caractéristiques des véhicules considérés sont présentées dans le Tableau 3.5. Les distances journalières devant être couvertes par la charge de la batterie sont réparties parmi les détenteurs de véhicules électriques par distribution gaussienne en fonction de la distance journalière moyenne effectuée en France [165]. Les distances considérées sont résumées dans le Tableau 3.6. Enfin, pour correctement modéliser une charge, il est nécessaire de considérer

la puissance de recharge disponible par la prise ou la borne installée. Il existe différents types de bornes allant de la charge lente à la charge très rapide (de 3,7 kW à plus de 150 kW), mais seules les charges domestiques seront considérées ici. Les puissances ont été choisies pour représenter deux types de charge possibles à la maison : une traditionnelle avec une simple prise, et une dite rapide avec installation d'une borne. Les puissances de charge retenues sont présentées dans le Tableau 3.7.

Modèle	Consommation(Wh/km)	Répartition considérée
Renaut Zoé	150	0.8
Nissan Leaf	174	0.2

TABLEAU 3.5 – Paramètres des véhicules électriques considérés

Distance moyenne [km]	Écart type [km]
30	10

TABLEAU 3.6 – Distance moyenne journalière parcourue considérée

Puissance de recharge [kW]	Répartition considérée
3.7	0.8
7	0.2

TABLEAU 3.7 – Puissances de recharge considérées

Simulation des données de production

Une fois les consommations d'énergie simulées, il est nécessaire de créer des données de production pour mettre la communauté dans un contexte d'auto-consommation collective. Le photovoltaïque est aujourd'hui la source d'énergie privilégiée par l'autoconsommation, par sa facilité d'intégration en toiture de bâtiments. Ainsi, la production fait intégralement partie du bâti et la source

d'énergie est au plus proche des consommations. Il existe différentes méthodes pour simuler des données de production. Des données météo sont généralement nécessaires pour simuler une production Photovoltaïque (PV). Pour cela, des bases de données existent telles Helioclim [166], Solcast [167],...

L'Union européenne a mis en place par exemple un logiciel en ligne qui permet de faire un pré-dimensionnement de centrale sur le territoire européen [168]. Ce genre d'outil est intéressant pour un non initié qui aimerait monter en compétence sur le photovoltaïque, mais la granularité des données retournées n'est pas suffisante pour mener une étude précise. Si le site est connu et les dimensions de toitures disponibles, il est possible de faire une étude de dimensionnement de la centrale qui permettra de connaître la production exacte de la centrale sur sa durée de vie en prenant en compte l'ensemble de la chaîne de perte de l'énergie lumineuse jusqu'à l'énergie délivrée. Une simulation 3D permet notamment de considérer les effets d'ombrage. Les pertes de transformation, celles dues aux températures de surface et la dégradation des modules dans le temps sont prises en compte. Cette méthode est notamment utilisée en bureau d'études grâce à des logiciels comme Pvsyst [169] ou Pvsol [170]. L'accès à l'ensemble des caractéristiques de sites est cependant à considérer (localisation exacte, zone d'implémentation des modules et des onduleurs, éléments provoquant de l'ombre sur les modules,...). D'autres méthodes pour dimensionner une installation sont possibles, comme élaborer un cadastre solaire en fonction des surfaces de toitures disponibles, comme proposé dans le cas d'étude [171]. Le machine learning est également une bonne solution pour de la prévision photovoltaïque lorsque le site étudié est déjà équipé d'une centrale PV et dont les données de production sont remontées régulièrement [172]. Si le site d'implantation n'est pas connu, il existe également des méthodes de prévisions basées sur des modèles stochastiques [173]. Pour aller plus loin sur les méthodes de prévisions de production photovoltaïque, [174] propose une revue de littérature sur une partie de ces méthodes concernant des prévisions à court terme.

L'objectif ici n'est pas de proposer une nouvelle méthode pour estimer ou prévoir des productions photovoltaïques. Aucun site n'était identifié dans nos travaux, donc il n'était pas possible d'utiliser les outils de dimensionnement traditionnels ou d'utiliser du machine learning. La production photovoltaïque a

donc été modélisée grâce à la bibliothèque Pvlib disponible sous Python [175] couplée à l'historique de données météo Solcast [167]. Le tableau 3.8 résume les caractéristiques retenues pour la modélisation du système photovoltaïque.

Latitude	50.62
Longitude	3.05
Puissance crête du module	200 Wc
Orientation des modules	180° (Sud)
Inclinaison des modules	30°

TABLEAU 3.8 – Caractéristiques du système Photovoltaïque

Résumé de l'origine des données énergétiques

L'origine de l'ensemble des données de consommations et d'approvisionnement énergétique a été présentée ci-dessus. La Figure 3.1 résume graphiquement les hypothèses retenues.

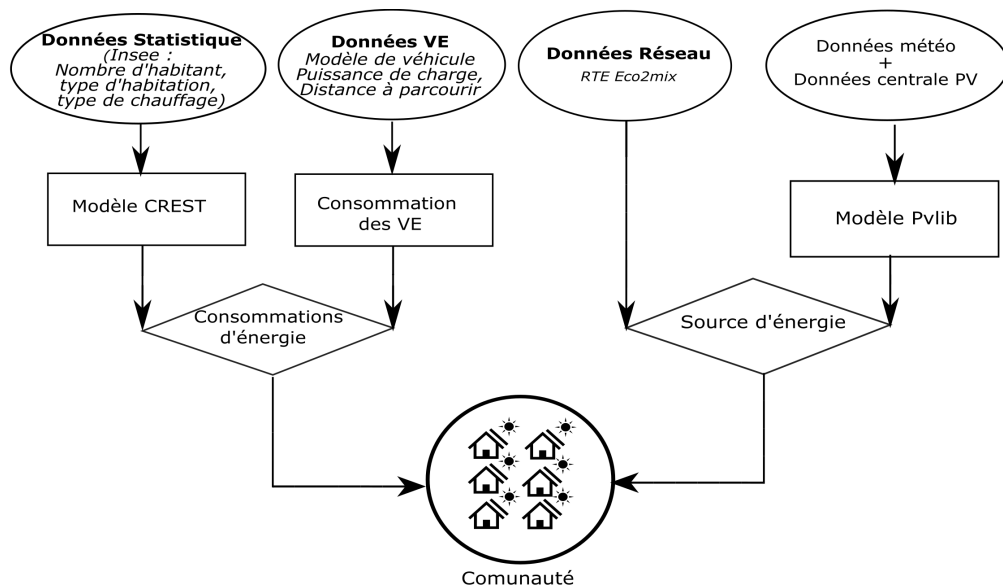


FIGURE 3.1 – Origine des données énergétiques de la communauté

3.1.2 Introduction de profils sociologiques

Comme présenté en 2.2.2, les recherches issues des SHS) ont permis d'identifier plusieurs idéaux-types qui reflètent les motivations des individus à adapter leur consommation d'énergie. Pour décider des profils qui seront étudiés dans ces travaux, il a fallu définir la communauté que nous souhaitions étudier. La majorité des travaux en SI se basant le plus souvent sur des communautés larges et ouvertes, le choix s'est porté sur une communauté dite fermée, dans le sens où le recrutement de ses participants est spécifique (C.f2.2.1). La thèse [29] avait de plus introduit l'interdisciplinarité dans les communautés d'énergies ouvertes. Il est apparu d'autant plus intéressant de se placer dans un contexte différent. Ainsi, cette définition de communauté a permis de sélectionner 3 profils parmi les 6 présentés auparavant :

- Les économes dont l'objectif est d'obtenir des tarifs énergétiques avantageux.
- Les éco-sensibles dont l'objectif est de réduire l'impact environnemental de leurs consommations d'énergie.
- Les autonomes dont l'objectif est de maximiser leur indépendance à des structures ou approvisionnements énergétiques externes à la communauté.

Ces profils se détachent des autres par une motivation forte à participer à un programme de gestion énergétique. La communauté énergétique devra donc répondre à 3 objectifs simultanément :

- Réduire la facture énergétique de ses participants
- Réduire son impact environnemental
- Augmenter son taux d'autoconsommation.

Le taux d'autoconsommation est le rapport entre l'électricité produite par une centrale d'Énergies Renouvelables (ENR) qui est immédiatement consommée localement (e_{auto}) et le total de la production d'électricité (e_{prod}) de cette centrale. Son calcul se fait selon l'équation 3.1 :

$$A = \frac{e_{auto}}{e_{prod}} \quad (3.1)$$

L'étude de ce type de communauté est également intéressante pour introduire des notions de coopération dans les gestions énergétiques. En effet, celle-ci sera construite autour d'un agrégateur central qui coordonnera les flux énergétiques pour répondre à ces 3 objectifs. D'un point de vue pratique, l'agrégateur pourrait être une entité représentative des membres de la communauté, ce qui permettrait une meilleure protection des données et une organisation horizontale de la communauté. Ainsi, les termes du contrat d'adhésion seraient connus de tous, et la modification de ceux-ci nécessiterait une approbation de tous les participants. L'introduction de modèles coopératifs centralisés va diriger les modèles économiques vers une organisation centralisée se rapprochant d'un marché de communauté. Celle-ci pourrait cependant être étendue à un marché hybride dans le sens où une communauté coopérative pourrait se fournir en énergie, soit sur le réseau de distribution, soit par d'autres communautés d'énergies lorsqu'elle n'a pas assez de ressources locales (ces deux notions ont été présentées en 2.2.4).

3.2 Prix de l'énergie

Un des aspects importants du travail repose dans le prix de l'énergie et des dépenses dédiées aux consommations d'énergie. Plusieurs hypothèses ont été retenues dans la construction de la communauté d'énergie aux niveaux des différents tarifs appliqués. Premièrement, d'un point de vue de la fourniture d'électricité du réseau, il existe 4 modèles de tarifications.

- Le Time Of Use pricing (TOU) : Modèle qui correspond aux Heures Pleines, Heures Creuses (HP/HC) en France.
- Le Critical Peak Pricing (CPP) : Modèle qui correspond aux tarifs Tempo en France.
- Le Real Time Pricing (RTP) : Dans ce modèle, le prix de l'électricité varie en temps réel en fonction des prix du marché.
- Le Peak Time Rebates (PTR) : Ce modèle repose sur le même principe que le CPP, mais qui récompense une baisse de consommation les jours de pointe.

L'hypothèse qui est retenue dans ces travaux est que la décentralisation de la production d'énergie associée à l'intermittence des énergies renouvelables ainsi que la libéralisation du marché de l'électricité va diriger les futures tarifications vers du RTP. Les variations des prix de l'énergie pourraient en effet permettre d'adapter les charges sur le réseau de distribution [176]. Les RTP possèdent souvent deux composantes. L'une est proportionnelle au prix spot du marché, l'autre varie en fonction de la puissance appelée sur le réseau. Différentes tarifications provenant des contextes anglais et espagnol sont présentées respectivement dans [177] et [178]. Ici, seule la composante proportionnelle au prix spot est retenue, ainsi le prix provenant du réseau (C_{grid}) représente le double du prix spot. Les prix spots correspondent à l'historique des prix de l'année 2019. L'année 2019 a été retenue, car les prix de cette période n'étaient ni impactés par la pandémie de COVID-19 ni par les contextes de conflits actuels.

Les prix de l'énergie autoconsommée (C_{auto}) ont ensuite été établis. Pour l'estimer, le LCOE (Levelized Cost of Energy) de l'installation photovoltaïque est calculé (Equation 3.3). Celui-ci dépend notamment du CAPEX (coûts d'investissement de la centrale) et de l'OPEX (coûts de maintenance de la centrale). Il représente le coût moyen de l'énergie produite par un générateur sur sa durée de vie. Le CAPEX moyen retenu est établi à 1,5 €/kWc installé, l'OPEX moyen est établi à 0.05 €/kWh [179], [180]. L'énergie produite annuellement, par kWc installé, retenue est estimée à 1000 kWh/kWc [181]. L'objectif de la communauté d'un point de vue financier est d'amortir le coût de l'installation photovoltaïque. L'énergie non autoconsommée (C_{inj}) et injectée sur le réseau est rémunérée au prix de l'énergie provenant du réseau le plus bas de la journée. Cela évite tout comportement de spéculation d'un foyer qui consommerait un maximum d'énergie possible pendant l'heure où l'énergie du réseau est la moins chère pour obtenir une réduction de la facture énergétique par revente de surplus d'énergie produite.

Cette définition de prix permet de fournir en énergie la communauté à moindre coût, mais également de dimensionner correctement la production en fonction des besoins en consommation et des moyens de flexibilité mis à disposition par la communauté. En effet, un surdimensionnement de l'installa-

tion mènerait à une perte financière de $(C_{auto} - C_{inj})$. L'injection d'énergie est considérée comme une perte, puisque le prix de l'énergie photovoltaïque est basé sur la rentabilisation de la centrale à sa fin de vie. Si un kWh n'est pas consommé, alors il y a une perte financière sur l'investissement.

Enfin, le coût associé à l'accès au réseau (C_{TURPE}) est pris en compte dans les calculs. Il se compose d'une partie fixe basée sur la puissance souscrite par le ménage et d'une partie variable basée sur la consommation d'énergie. Le calcul est issu du TURPE6 [182], dans lequel sont définis les tarifs pour l'utilisation des réseaux publics de transport d'électricité en France. En considérant, $e_{grid}(t)$, $e_{auto}(t)$ et $e_{inj}(t)$, respectivement l'énergie consommée provenant du réseau de la centrale photovoltaïque et injectée sur le réseau à un instant t , le coût total de l'énergie consommée peut être calculé grâce aux équations 3.2, 3.3, 3.4 et 3.5.

$$C_{grid}(t) = C_{Spot}(t) \times 2 \quad [\text{€/kWh}] \quad (3.2)$$

$$C_{auto} = \frac{CAPEX + OPEX}{E_{PVtot}} \quad [\text{€/kWh}] \quad (3.3)$$

$$C_{inj} = \min(C_{grid}(t)) \quad [\text{€/kWh}] \quad (3.4)$$

$$C_{tot}(t) = C_{grid}(t) \times e_{grid}(t) + C_{auto} \times e_{auto}(t) - C_{inj} \times e_{inj}(t) + C_{TURPE}(t) \quad [\text{€}] \quad (3.5)$$

3.3 Méthodologie de prise en compte des impacts environnementaux

3.3.1 Choix de la méthode ACV

Comme présenté en 2.3, quantifier des impacts environnementaux n'est pas simple et il n'existe pas de méthodologie pleinement adaptée au contexte des réseaux électriques. L'Analyse sur Cycle de Vie (ACV) offre une approche holistique qui compte toutes les étapes du cycle de vie d'un produit ou d'un système

(l'extraction des matières premières, la fabrication, le transport, l'utilisation et l'élimination en fin de vie). Une ACV suit quatre phases clés, telles que définies par les normes ISO 14040 :2006 [183] et ISO 14044 :2006 [184] :

1. La définition des objectifs et du champ d'application : Cette phase permet de définir l'unité fonctionnelle et les limites du système. L'unité fonctionnelle est le paramètre de référence quant au résultat attendu d'une solution qui permet de la comparer à un autre produit/système. Pour l'analyse d'un Smart Grid, l'unité fonctionnelle pourrait être l'électricité produite et distribuée. Les limites du système engloberaient toutes les étapes depuis la fabrication de l'équipement du réseau intelligent jusqu'à son élimination en fin de vie.
2. L'inventaire du cycle de vie : Dans cette phase, les données de l'ensemble des intrants et extrants spécifiques à chaque étape du cycle de vie sont collectées¹. Les données peuvent être obtenues à partir de diverses sources, notamment les bases de données industrielles, les fabricants de produits et la littérature scientifique.
3. L'évaluation de l'impact du cycle de vie : La phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie permet de quantifier les impacts environnementaux potentiels du système analysé. Elle caractérise les données collectées en termes d'indicateurs environnementaux, tels que les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'énergie, la pollution de l'air et de l'eau et l'épuisement des ressources. Ces indicateurs permettent une comparaison complète des divers impacts environnementaux à travers les différentes étapes du cycle de vie. À la fin de cette phase, les impacts environnementaux les plus significatifs et les hotspots sont identifiés. Les hotspots sont les points critiques qui sont les plus significatifs d'un point de vue impact environnemental et qui représentent les plus gros leviers d'action pour réduire les impacts environnementaux.

1. Les intrants et extrants désignent les flux de matières, d'énergie, et d'émissions qui entrent et sortent d'un système analysé. Ainsi les intrants sont toutes les ressources nécessaires au fonctionnement du système, telles que les matières premières, l'énergie, l'eau, et les autres ressources entrant dans le processus de production ou d'exploitation. Et les extrants sont les produits, co-produits, émissions, déchets, et toute autre forme de rejet ou de sortie générée par le système étudié, à la fin d'un processus ou d'une activité.

4. L'interprétation : Cette dernière phase consiste à analyser les résultats pour en tirer des conclusions significatives. Les hotspots et les impacts environnementaux significatifs identifiés au cours de la phase d'évaluation d'impact du cycle de vie sont mis en évidence et des recommandations sont formulées en vue d'améliorations et d'optimisations potentielles. Cette étape aide les parties prenantes, les décideurs politiques et les acteurs de l'industrie à prendre des décisions éclairées sur la manière d'atténuer les impacts environnementaux du cycle d'un produit/système.

L'ACV fournit une approche quantitative et scientifique pour évaluer la performance environnementale de technologies telles que les réseaux intelligents. Grâce à cette méthode, les décideurs peuvent se faire une idée des avantages et des inconvénients potentiels de la mise en œuvre de Smart Grid et identifier des stratégies pour maximiser les impacts positifs tout en minimisant les effets négatifs sur l'environnement de ces solutions. Dans le contexte de notre recherche, l'ACV est essentielle pour comprendre les implications environnementales associées à la mise en œuvre, à l'exploitation et au démantèlement éventuel d'une infrastructure de gestion de l'énergie avancée. En analysant le cycle de vie complet, l'ACV permet aux chercheurs d'identifier les hotspots pour l'environnement, d'évaluer les contributions des différentes étapes du cycle de vie sur l'impact environnemental global et d'éclairer les processus de prise de décisions durables. Ainsi, la méthode sera ici utilisée pour poursuivre différents objectifs :

- Proposer une vision globale des impacts environnementaux liés aux consommations d'énergie électrique.
- Quantifier les avantages environnementaux de la consommation d'énergie renouvelable locale.
- Proposer des ordres de grandeur sur les impacts environnementaux liés au développement de technologies d'automatisation des flexibilités énergétiques.
- Proposer une méthodologie d'évaluation d'impact environnemental des consommations d'énergie électrique dans laquelle sera considérée à la fois l'origine de l'électricité (méthode utilisée lorsque l'impact environnemental est quantifié), mais aussi les impacts du réseau. La raison est

que nos travaux de recherche se situent dans un contexte d'adaptation des réseaux électriques au nouveau paradigme de gestion énergétique pour limiter le réchauffement climatique. Cela sous-entend une modification de ces réseaux, mais pour estimer convenablement les gains environnementaux sur les consommations énergétiques, il est impératif d'intégrer la phase de transmission de l'énergie de son lieu de production au lieu de consommation.

3.3.2 Application de l'ACV

À la fin du processus, l'ACV présente les indicateurs de dommages sur l'environnement du système étudié appelés "midpoints". Les midpoints sont les impacts spécifiques du produit ou processus étudié. Ils permettent une quantification détaillée de différents impacts environnementaux identifiés, tels que le changement climatique, l'acidification des sols ou l'eutrophisation de l'eau. La liste des midpoints ainsi que leur signification sont présentés en Annexe A [185]. L'ACV permet de mettre en avant l'étape du cycle de vie la plus impactante d'un système sur l'environnement et de connaître l'impact environnemental le plus significatif de ce système.

Il est également possible de pondérer l'ensemble des midpoints afin d'assigner un score environnemental du système étudié. Dans notre travail de recherche, cette méthodologie est intéressante car elle permet de comparer l'état initial d'un système à un autre état du même système. Ainsi, il permet de regarder l'évolution de l'impact environnemental de l'énergie délivrée à un foyer en fonction de l'origine de cette énergie et du mix énergétique à un instant donné. De même, il permettra également d'estimer le gain environnemental réel d'un système de gestion énergétique en prenant en considération les technologies nécessaires à l'optimisation automatique des appareils de flexibilité.

La problématique d'un indicateur environnemental unique est complexe, et la méthode la plus simple proposée est souvent celle d'un poids égal entre tous les impacts. Toute pondération implique intrinsèquement des choix de valeurs qui dépendront des politiques, des préférences culturelles et d'autres systèmes de valeurs, rendant difficile un consensus sur cette question. L'approche

retenue ici est celle du Joint Research Center (JRC), qui repose sur la pondération des impacts par deux groupes distincts : 2400 personnes issues de la société civile de six pays européens différents et 518 experts des questions d'ACV [186]. L'ensemble des impacts, les facteurs de normalisation (NFs) de chaque impact, ainsi que leurs pondérations respectives sont présentés dans le tableau 3.9.

Une modification a été apportée par rapport à l'approche initiale, en regroupant les deux derniers impacts : l'épuisement des ressources minérales et des métaux avec celui de l'épuisement des ressources fossiles.

Catégorie d'impact	Unité	NFs	Pondération [%]
Climate change	kg CO2 eq	5.3E+13	21.6
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	1.6E+08	6.3
Human toxicity, non-cancer effects	CTUh	3.2E+06	1.8
Human toxicity, cancer effects	CTUh	2.6E+05	2.1
Particulate matter	kg PM2.5 eq	4.2E+06	9.0
Ionizing radiation HH	kBq U235 eq	2.0E+12	5.0
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	2.8E+11	4.8
Acidification	molc H+ eq	3.8E+11	6.2
Terrestrial eutrophication	molc N eq	1.2E+12	3.7
Freshwater eutrophication	kg P eq	5.1E+09	2.8
Marine eutrophication	kg N eq	1.9E+11	3.0
Freshwater ecotoxicity	CTUe	8.1E+13	1.9
Land use	kg C deficit	1.9E+16	7.9
Water resource depletion	m3 water eq	7.9E+13	8.5
Mineral, fossil & ren resource depletion	kg Sb eq	3.9E+08	15.3

TABLEAU 3.9 – Pondérations des impacts environnementaux dans le score unique

3.3.3 ACV de l'électricité délivrée en milieu résidentiel

Dans ces travaux de recherches, une attention particulière a été portée aux impacts environnementaux des consommations d'électricité de bâtiments résidentiels sur un réseau BT. Comme évoqué au paragraphe 2.3.2, la réduction d'impact environnemental est rarement correctement quantifiée dans les travaux liés aux gestions énergétiques. Ici, nous souhaitons dans un premier temps suivre l'évolution de ces impacts sur les consommations directes d'énergie en fonction de différents scénarios de flexibilité. Les données d'impacts environnementaux des différents moyens de production électrique sur le réseau étudié sont nécessaires pour aller au-delà du simple indicateur CO_2eq utilisé traditionnellement dans la littérature. L'unité fonctionnelle ici utilisée est « 1 kWh délivré sur le réseau basse tension », et seront donc pris en compte : l'impact de la production, des transformations entre les différents niveaux de tension, et les pertes du transport de cette électricité de la centrale au consommateur. Ce paragraphe a vocation à préciser les hypothèses retenues dans l'étude ACV.

Origine des données et méthodes

Les deux bases de données officielles françaises en termes d'analyse environnementale sont [187] :

- La Base Carbone® : C'est la base nationale de référence des facteurs d'émissions utilisés dans le cadre de la réalisation de bilans réglementaires des émissions de gaz à effet de serre.
- La Base Impacts® : C'est la base officielle de données génériques d'inventaire pour le programme national d'affichage environnemental des produits de grande consommation.

Portées par l'ADEME, ces deux bases sont amenées à fusionner dans un futur proche pour n'avoir plus qu'une seule référence : la Base Empreinte®. Dans le cas de la production d'électricité, la Base Carbone® est utilisée par l'outil Eco2mix du gestionnaire de réseau électrique de distribution RTE pour évaluer les émissions de GES du réseau français, mais cette dernière ne regroupe que ces émissions pour évaluer l'impact carbone équivalent et ne permet pas de modéliser l'en-

semble des impacts. Pour rester en cohérence avec les préconisations françaises, la méthodologie employée ici repose sur l'approche utilisée par la base Impacts® : les données utilisées dans ce projet proviennent toutes de la base Ecoinvent 3 v3.6 de 2019 [188] (utilisée aussi par la Base Carbone®) et sont traitées en indicateurs d'impact potentiel selon l'approche ACV, via les méthodes de caractérisation préconisées par le JRC (Joint Research Center, centre de recherche de la Commission Européenne) dans l'ILCD Handbook [185]. L'étude d'impact est celle de la méthode ILCD 2011 Midpoint+ V1.11, avec la pondération de la méthode EC-JRC Global, equal weighting [189]. Les 16 catégories d'impacts sont regroupées et définies en Annexe A.

Données et hypothèses

L'ensemble des données de la base de données utilisée sont répertoriées dans le tableau 3.10. Quelques précisions sont à apporter sur certaines entrées de l'étude ACV menée :

- La donnée concernant le réseau ne prend pas en compte l'impact des différentes transformations sur celui-ci ni les pertes associées. Pour tenir compte des pertes durant l'acheminement, un coefficient de 2% de pertes est pris en compte sur le réseau de transport et de 6% sur le réseau de distribution sur l'énergie totale produite. Le calcul entre l'énergie E_{HT} en sortie de centrale connectée au réseau HT et l'énergie E_{BT} livrée sur le réseau BT est donné par l'équation 3.6 et est présenté dans la Figure 3.2 :

$$E_{HT} = \frac{E_{BT}}{((1 - 0.02) * (1 - 0.06))} \quad (3.6)$$

- Concernant la source gaz du mix électrique, le ratio est établi entre les centrales conventionnelles (Turbines à combustion (TAC)) et les centrales à cycle combiné (Cycle COMbiné Gaz (CCG)). L'hypothèse est que le ratio de production est proportionnel au ratio de tranche de chaque type de centrale, ici de 7 TAC contre 14 CCG [190]. La donnée de production

d'électricité par gaz est donc calculée selon l'équation 3.7 :

$$DATA_{gaz} = \frac{1}{3} * DATA_{TAC} + \frac{2}{3} * DATA_{CCG} \quad (3.7)$$

- Pour l'éolien, seul le parc terrestre est considéré (la France n'ayant pas encore de parc éolien offshore raccordé), avec une puissance moyenne par générateur entre 1 et 3MW [191]. L'hypothèse faite ici est que la plus grande majorité des parcs éoliens est reliée au réseau HTA et non HTB, seule la transformation $HTA > BT$ sera donc prise en compte.
- Pour l'impact de la production hydraulique, 3 types de centrale sont regroupés : les centrales de montagne, celles au fil de l'eau, et les autres (marémotrices et STEP). L'hypothèse est que leur impact relatif est proportionnel au ratio de leur production sur l'année 2021, respectivement 25.1GWh, 31.4GWh et 6.5GWh [192]. Leur impact est donc calculé comme ceci (Equation 3.8) :

$$DATA_{Hydro} = 0.4 * DATA_{montagne} + 0.5 * DATA_{fil} + 0.1 * DATA_{autres} \quad (3.8)$$

- Pour le photovoltaïque pris sur le réseau, la donnée correspond aux grandes centrales connectées au réseau basse tension et prend en compte la transformation DC/AC (aucune donnée disponible pour le monocristallin, seul le polycristallin est considéré ici). On y ajoutera une transformation $HTA > BT$ pour représenter le transport de cette énergie sur le réseau.
- Une différenciation est faite sur le photovoltaïque pour l'impact du photovoltaïque produit localement au sein de la communauté. Le marché du photovoltaïque en France est dominé par les technologies silicium à 95% (partagé entre le monocristallin à 40% et le multicristallin à 60%) [193]. La donnée $Data_{PVlocal}$ retenue pour le photovoltaïque est donc calculée comme ceci (Equation 3.9) :

$$DATA_{PVlocal} = 0.4 * DATA_{mono} + 0.6 * DATA_{multi} \quad (3.9)$$

Les pertes du réseau de distribution sont ajoutées à l'énergie produite

localement, mais qui n'est pas consommée par la communauté. Nous considérons donc qu'un kWh injecté en sortie de centrale équivaut à 0.94 kWh (6% de pertes sur le réseau de distribution) qui peut être délivré en dehors de la communauté.

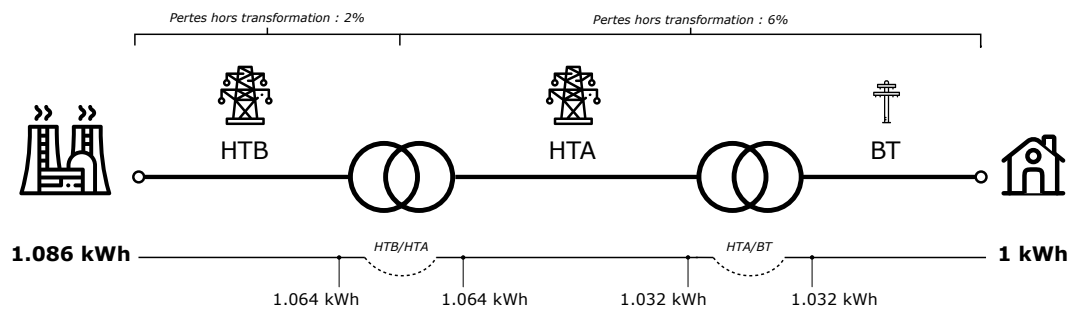


FIGURE 3.2 – Modélisation des pertes prises en compte dans l'ACV

Données	Source dans la Base de données
Transformations <i>HTB > HTA > BT</i>	— <i>Electricity country mix/Medium Voltage/Transformation : Electricity, medium voltage {FR} Electricity voltage transformation from high to medium voltage APOS, S</i> — <i>Electricity country mix/Low Voltage/Transformation : Electricity, low voltage {FR} Electricity voltage transformation from medium to low voltage APOS, S</i>
Réseau	<i>Electricity country mix/low voltage/market : Electricity, low voltage {FR} market for APOS, S</i>
Production au Fioul	<i>Energie/Electricity by fuel/ Oil/Transformation : Electricity, high voltage {FR} Electricity production, oil APOS, S</i>
Production au Charbon	<i>Energie/Electricity by fuel/ Coal/Transformation : Electricity, high voltage {FR} Electricity production, hard coal APOS, S</i>
Production nucléaire	<i>Energie/Electricity by fuel/Nuclear/PWR/Transformation : Electricity, high voltage {FR} Electricity production, nuclear, pressure water reactor APOS, S</i>
Production par bioénergies	— <i>Energie/Electricity by fuel/Waste/Market : Electricity, medium voltage {FR} Electricity, from municipal waste incineration to generic market for APOS, S</i>

TABLEAU 3.10 – Source utilisée pour l'étude ACV de l'énergie délivrée en milieu résidentiel

Données	Source dans la Base de données
Production par gaz	— <i>Energie/Electricity by fuel/ Gas/Transformation : Electricity, high voltage {FR} Electricity production, natural gas, conventional power plant APOS, S</i> — <i>Energie/Electricity by fuel/ Gas/Transformation : Electricity, high voltage {FR} Electricity production, natural gas, combined cycle power plant APOS, S</i>
Production éolienne	<i>Energie/Electricity by fuel/Wind/Transformation : Electricity, high voltage {FR} Electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore APOS, S</i>
Production PV réseau	<i>Energie/Electricity country mix : Electricity, low voltage {FR} Electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si APOS, S</i>
Production PV local	— <i>DAT A_{mono} : Energie/Electricity by fuel/Photovoltaic/Transformation : Electricity, low voltage {FR} Electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted APOS, S</i> — <i>DAT A_{multi} : Energie/Electricity by fuel/Photovoltaic/Transformation : Electricity, low voltage {FR} Electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted APOS, S</i>

TABLEAU 3.10 – Source utilisée pour l'étude ACV de l'énergie délivrée en milieu résidentiel

Données	Source dans la Base de données
Production Hydraulique	— <i>DATA_{montagne}</i> : <i>Energie/Electricity by fuel/Hydro/Reservoir/transformation</i> : Electricity, high voltage {FR} Electricity production, hydro, reservoir, alpine region APOS, S — <i>DATA_{fil}</i> : <i>Energie/Electricity by fuel/Hydro/Flow Through/transformation</i> : Electricity, high voltage {FR} Electricity production, hydro, run-of-river APOS, S — <i>DATA_{autres}</i> : <i>Energie/Electricity by fuel/Hydro/Pumping storage/Transformation</i> : Electricity, high voltage {FR} Electricity production, hydro, pumped storage APOS, S

TABLERAU 3.10 – Source utilisée pour l’étude ACV de l’énergie délivrée en milieu résidentiel

Le tableau 3.11 résume les scores environnementaux de chaque source d'énergie en prenant en compte l'ensemble des impacts et données présentés ci-dessus. Après la normalisation et la pondération des données, l'ensemble des scores est multiplié par 10^{12} pour plus de lisibilité des scores. Le détail des impacts est présenté en Annexe B.

Source d'énergie	Score
PV local	1.87
PV réseau	2.69
Nucléaire	2.16
Hydraulique	1.93
Gaz	2.23
Fioul	20.42
Eolien	1.25
Charbon	11.59
Bioénergie	26.56

TABLEAU 3.11 – Score ACV attribué à chaque source d'énergie par analyse ACV

L'impact environnemental du kWh final consommé par un foyer à un instant t est défini par l'équation 3.10 :

$$\tau_{tot}(t) = \tau_{grid}(t) \times e_{grid}(t) + \tau_{auto} \times e_{auto}(t) - \tau_{inj} \times e_{inj}(t) \quad [Points/kWh] \quad (3.10)$$

Comme le rappelle le rapport du JRC sur la création d'indicateurs environnementaux [189], le choix de pondération des indicateurs dépend des sensibilités aux problématiques locales et des priorités en matière d'environnement. Cette méthodologie a été choisie car elle repose sur une consultation citoyenne accompagnée d'une consultation d'experts. Il a également été décidé de considérer l'ensemble des midpoints, même si certains sont scientifiquement moins robustes (par exemple les impacts dédiés à la santé humaines sont parfois moins consensuelles dans la communauté scientifiques que les données d'impacts sur le réchauffement climatique). L'objectif n'est pas de déterminer quelle source d'énergie est la plus ou la moins impactante, mais de proposer une méthodologie couvrant l'ensemble des impacts observables. Évidemment, en fonction des priorités locales et en l'absence d'une méthodologie consensuelle pour mesurer

les impacts environnementaux liés à la distribution d'énergie électrique, ces pondérations doivent être adaptées aux spécificités locales de la communauté observée.

3.3.4 ACV des appareils de flexibilité

Un autre objectif de ces travaux est d'introduire une méthodologie permettant de prendre en compte l'impact environnemental des appareils nécessaires aux flexibilités. Celle-ci permettra de faire ressortir des premiers résultats et ordres de grandeur, ainsi que d'illustrer les questions de recherche et les angles morts qui ne sont pas encore traités dans la littérature. Pour illustrer le propos, les systèmes de flexibilité seront étudiés de manière simplifiée pour un cas résidentiel, et l'étude se basera sur les travaux [194] et [195].

La première hypothèse émise est que l'ensemble des données passe par le wifi local qui existe déjà (ce qui est le cas dans 79% des smart homes étudiés dans [194]). L'architecture des Technologies de l'Information et de Communication (TIC) n'est donc pas prise en compte, car elle est décorrélée de la flexibilité. Il en va de même pour la communication entre l'utilisateur et le système de flexibilité qui se fait en majorité au travers d'équipements déjà présents au sein des foyers (80% Smartphone/tablette [194]). La considération du poids environnemental des solutions logicielles pourrait être nécessaire, mais cela ne se justifierait que dans un cas d'étude plus précis et mieux documenté. De même, les compteurs intelligents ne sont pas pris en compte dans l'étude, car le taux de pénétration de ces équipements est déjà proche de 100% en France (le territoire étant couvert à 95% par le GRD Enedis [196] dont 95% sont équipés du Linky – 35,6 millions pour 37,5 millions de clients [197]). Seules les prises connectées permettant de mesurer la charge et de l'interrompre/l'alimenter sont considérées, ainsi qu'un serveur local commun pour l'ensemble des foyers, et sont détaillées par la suite. Sur les cycles de vie de chaque élément, le scénario d'élimination des déchets considéré dans la modélisation provient de l'entrée *Waste (waste scenario)* {FR}| **treatment of waste** | **APOS, S** de la base de données Ecoinvent. Ce scénario générique mériterait lui aussi un approfondissement en s'intéressant à la fin de vie des équipements électroniques en France dans de futures études.

Comme précédemment, l'étude d'impact se fait sur la base de l'indicateur unique discuté en 3.3.2.

Le Tableau 3.12 récapitule les informations retenues pour l'ACV des appareils de flexibilité. Les données de la prise connectée considérée proviennent de [195], issues de la base Ecoinvent. Le serveur sera considéré comme un PC sans écran contenant un disque dur et l'origine des données est la même que pour les prises connectées. À ces impacts, il est nécessaire de rajouter l'impact de l'énergie consommée par ces appareils. Une puissance de 4 W continue est ajoutée aux consommations des foyers par chaque smart plug ajouté pour rendre un appareil flexible. De même, il est considéré que l'ordinateur appelle 141 W en continu (Tableau 3.4) Cela permet d'évaluer l'impact en fonction de l'origine de l'énergie consommée (mix du réseau, autoconsommation).

Donnée serveur	
Computer, desktop, without screen {GLO} market for APOS, S	1 P
Hard disk drive, for desktop computer {GLO} market for APOS, S	1 P
Données Smart plug	
Coque	
Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO} market for APOS, S	100 g
Injection moulding {GLO} market for APOS, S	100 g
Electronique	
Printed wiring board, for through-hole mounting, Pb containing surface {GLO} market for APOS, S	30 cm ²
Light emitting diode {GLO} market for APOS, S	1 g
Inductor, miniature radio frequency chip {GLO} market for APOS, S	1 g
Mounting, surface mount technology, Pb-containing solder {GLO} market for APOS, S	30 cm ²

TABLEAU 3.12 – Données de l'Etude ACV matériel de flexibilité

L'ensemble des impacts seront répartis sur l'ensemble de la communauté. Chaque appareil flexible automatisable se verra associer un smart plug et un serveur sera dédié à l'optimisation des consommations de la communauté. L'im-

pact sera de plus réparti en fonction de la durée de vie de l'équipement estimée à 5 ans [195]. L'impact de ces appareils, rapporté sur une journée, est donc considéré. Le Tableau 3.13, résume les impacts environnementaux d'un serveur et d'un smart plug selon les hypothèses retenues : le score environnemental unique total attribué et l'impact journalier d'un appareil.

Catégorie d'impact	Unité	1 p SmartPlug	Serveur
Climate change	kg CO2 eq	1,22E+00	2,54E+02
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	1,79E-07	2,42E-05
Human toxicity, non-cancer effects	CTUh	1,55E-06	4,99E-04
Human toxicity, cancer effects	CTUh	1,26E-07	4,90E-05
Particulate matter	kg PM2.5 eq	1,16E-03	2,61E-01
Ionizing radiation HH	kBq U235 eq	1,41E-01	3,09E+01
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	4,46E-03	1,07E+00
Acidification	molc H+ eq	9,44E-03	2,06E+00
Terrestrial eutrophication	molc N eq	1,55E-02	3,80E+00
Freshwater eutrophication	kg P eq	1,06E-03	3,20E-01
Marine eutrophication	kg N eq	1,49E-03	3,55E-01
Freshwater ecotoxicity	CTUe	1,57E+02	4,93E+04
Land use	kg C deficit	1,80E+00	4,07E+02
Water resource depletion	m3 water eq	1,65E-05	3,37E-01
Mineral, fossil & ren resource depletion	kg Sb eq	2,53E-04	3,92E-01
Indicateur Unique	Score	24,37	5646,81
Indicateur Unique journalier	Score/jour	0.013	3.1

TABLEAU 3.13 – Impacts environnementaux des appareils de flexibilité

3.4 Processus d'optimisation

3.4.1 Approche globale

Le processus d'optimisation retenu repose sur un superviseur à J-1 centralisé. L'ensemble du processus est divisé en trois sous-catégories.

- Une optimisation individuelle fictive qui servira de point de comparaison pour les étapes suivantes (3.4.4, Figure 3.3 (B1)).
- Une optimisation collective qui servira de référence pour la stratégie optimale à poursuivre (3.4.5, Figure 3.3 (B2)).
- Une redistribution de gains par la théorie des jeux (Chapitre 4, Figure 3.3 (C, D)).

Le schéma 3.3 résume le processus d'optimisation total.

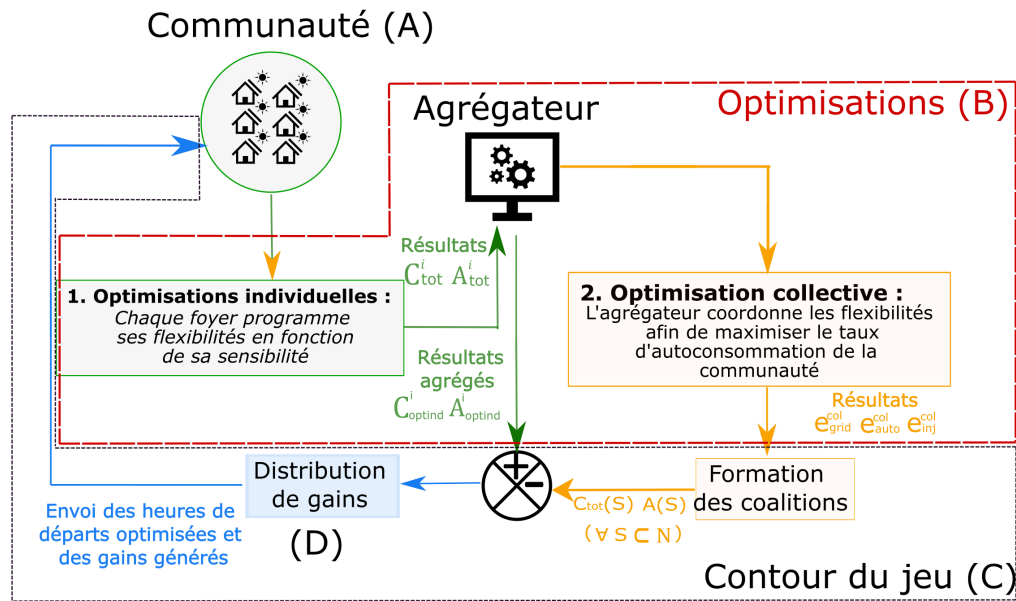


FIGURE 3.3 – Méthodologie et processus d'optimisation

3.4.2 La flexibilité, le paramètre d'optimisation

Technologiquement, l'approche retenue repose sur des moyens de flexibilité incluant des VE. Ainsi, différents types d'appareils sont supposés pouvoir être décalés dans le temps suivant des contraintes propres à leur usage. La Figure 3.4 donne des exemples de flexibilité en fonction du type d'appareil.

- Les appareils fixes : Ce sont des appareils qui ne pourront pas être déplacés dans la journée, soit par des contraintes d'usage ou par des contraintes de confort (télévision, ordinateur, four,...). Les contraintes associées de ces appareils sont présentées par l'équation 3.11

$$\forall a \in \mathbb{D}_{fix}^i, \forall t \in T, e_{a,t}^i = \hat{e}_{a,t}^i \quad (3.11)$$

- Les appareils de types cycle : Ce sont des appareils qui pourront être décalés dans le temps, mais qui une fois démarrés ne pourront pas être arrêtés et devront finir leur cycle de fonctionnement (machine à laver, lave-vaisselle,...). Les contraintes associées de ces appareils sont présentées par l'équation 3.12.

$$\forall a \in \mathbb{D}_{cycl}^i, t_a^s \in \llbracket t_a^{min}, t_a^{max} - T_a \rrbracket \quad (3.12)$$

- Les appareils Tout-Ou-Rien (TOR) : Ce sont des appareils à puissance nominale fixe qui peuvent être activés à n'importe quel moment. La seule contrainte associée à leur flexibilité est de fournir le même service en termes de consommations d'énergie que ce qui était prévu avant l'optimisation (chauffe-eau...). Les contraintes associées de ces appareils sont présentées par l'équation 3.13.

$$\forall a \in \mathbb{D}_{oo}^i \left\{ \begin{array}{l} e_{a,t}^i \in \{0, P_a\} \\ \llbracket t_a^s, t_a^e \rrbracket \subset \llbracket t_a^{min}, t_a^{max} \rrbracket \\ \sum_{t=1}^T e_{a,t}^i = \sum_{t=1}^T \hat{e}_{a,t}^i \end{array} \right. \quad (3.13)$$

- Les VE : Les véhicules électriques sont ici considérés comme des appareils TOR avec une contrainte supplémentaire. Ils ne peuvent être chargés

que lorsqu'il y a une présence dans le foyer. Les temps de présence des foyers sont calculés et distribués dans la communauté grâce aux données statistiques de l'enquête Phebus [198].

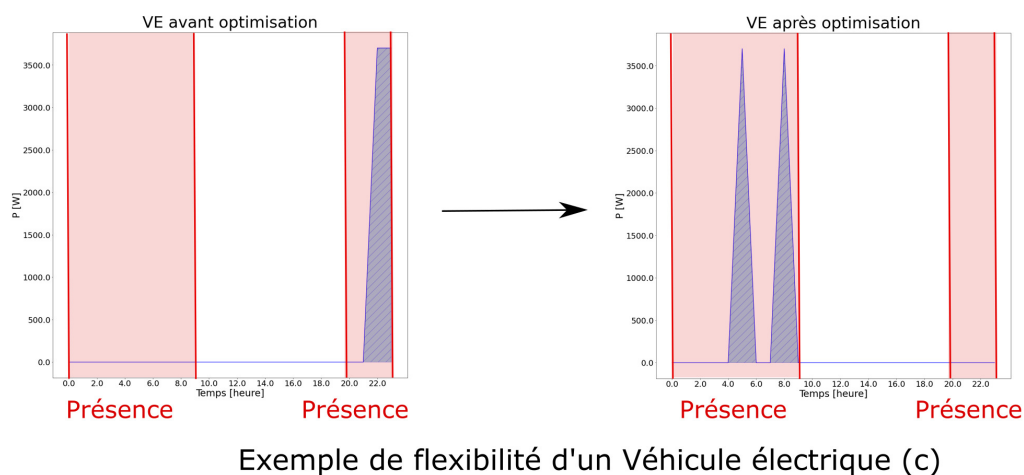
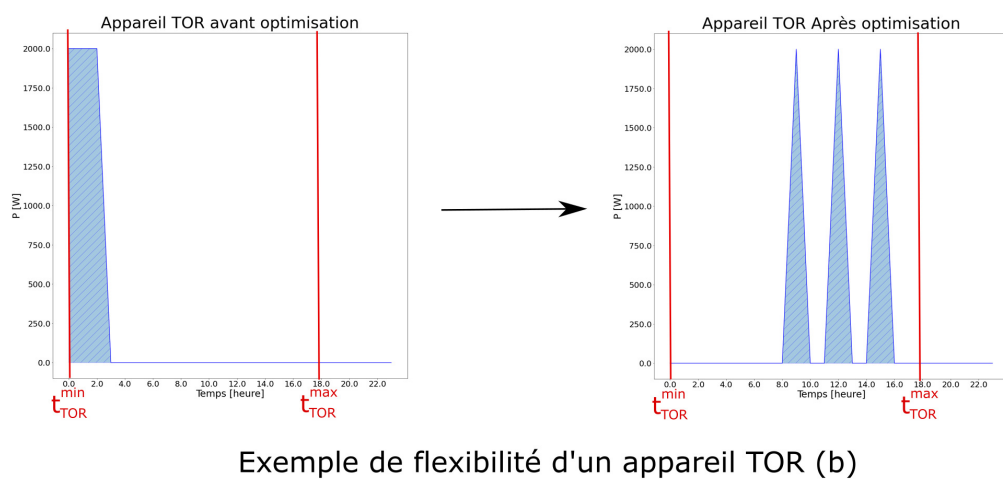
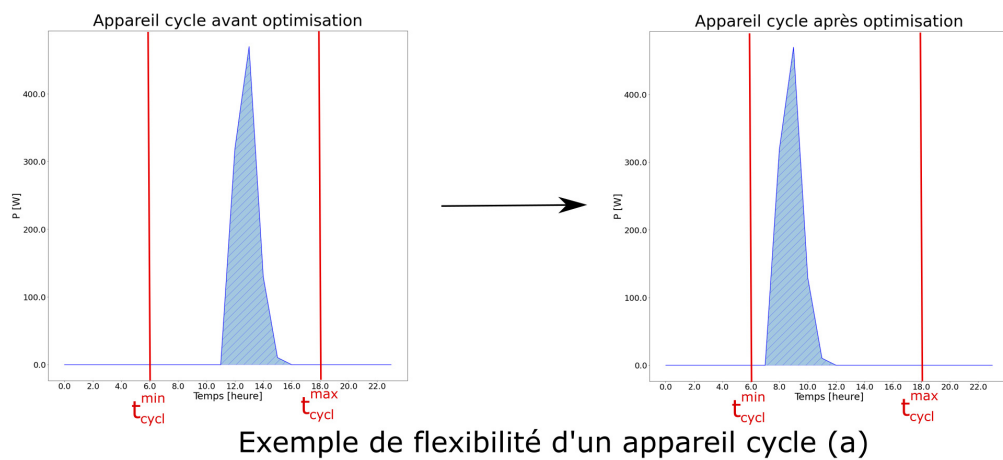


FIGURE 3.4 – Exemple de flexibilité par type d'appareils (Cycle (a), TOR (b), VE (c))

3.4.3 Méthode d'optimisation retenue

Les combinaisons d'appareils associées à chaque pas de temps évoluent exponentiellement en fonction du nombre d'appareils considérés et des plages de temps autorisées pour leur démarrage. Ainsi, il a été choisi de se tourner vers une méthode d'optimisation métaheuristique : l'optimisation par essaim de particules. C'est une méthode d'optimisation dans laquelle un nuage de particules va se déplacer dans l'espace d'étude en fonction des meilleurs résultats d'une particule et du meilleur résultat obtenu par l'ensemble du nuage. Ainsi, une particule est définie par une position et une vitesse X_i^t et V_i^t définies par l'équation 3.14 [199] :

$$\begin{aligned} X_i^{t+1} &= V_i^{t+1} + X_i^t \\ V_i^t &= W \cdot V_i^t + C1 \cdot (P_{best}^t - X_i^t) + C2 \cdot (G_{best}^t - X_i^t) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Avec :

- P_{best}^t : la meilleure position de la particule
- G_{best}^t : la meilleure position de l'ensemble des particules
- $W, C1$ et $C2$: paramètres de l'algorithme

La Figure 3.5 résume les influences des paramètres sur le déplacement d'une particule.

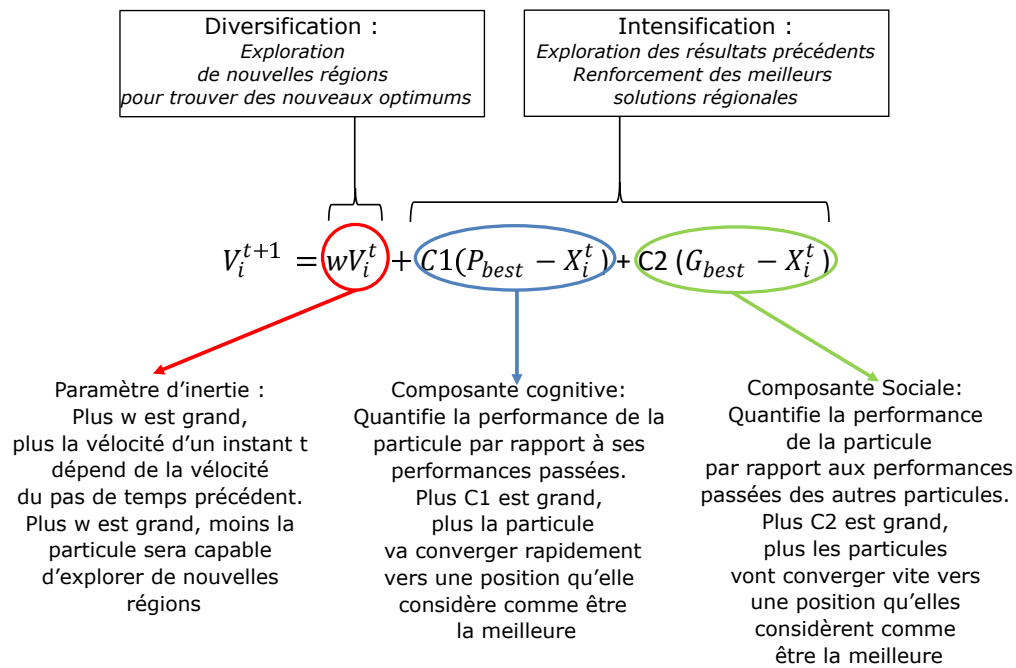


FIGURE 3.5 – Influence des paramètres de l'algorithme d'optimisation

Dans cette étude, un nuage de p particules sera généré pour chaque appareil flexible. Ainsi, chaque appareil constitue un espace de recherche dans lequel le nuage circulera. Un exemple d'évolution schématisée d'un nuage de 2 points dans un espace est donné en Figure 3.6. L'algorithme est déployé grâce à la bibliothèque open source Pyswarm développée sous Python [200]. Les paramètres W , $C1$ et $C2$ doivent être paramétrés en fonction de ce qui est recherché dans le processus d'optimisation. Dans le cas de cette étude, il a été choisi de diriger l'algorithme dans une direction exploratoire. En effet, plusieurs minimums peuvent être trouvés. Mal paramétré, l'algorithme pourrait très rapidement converger vers un minimum local éloigné du minimum global de la fonction. Pour paramétrer l'algorithme dans notre cas d'étude, une approche empirique sur un paramétrage exploratoire a donc été faite. Pour cela, l'observation du coût minimal trouvé par le nuage à chaque itération est un bon indice pour observer le comportement de l'algorithme. La Figure 3.7 donne un exemple de cette évolution avec un paramétrage à convergence rapide (3.7 (a)) et un paramétrage exploratoire (3.7 (b)). Dans cet exemple, la maximisation du taux d'autoconsommation est recherchée, donc le coût associé à la minimisation est

l'opposé du taux d'autoconsommation.

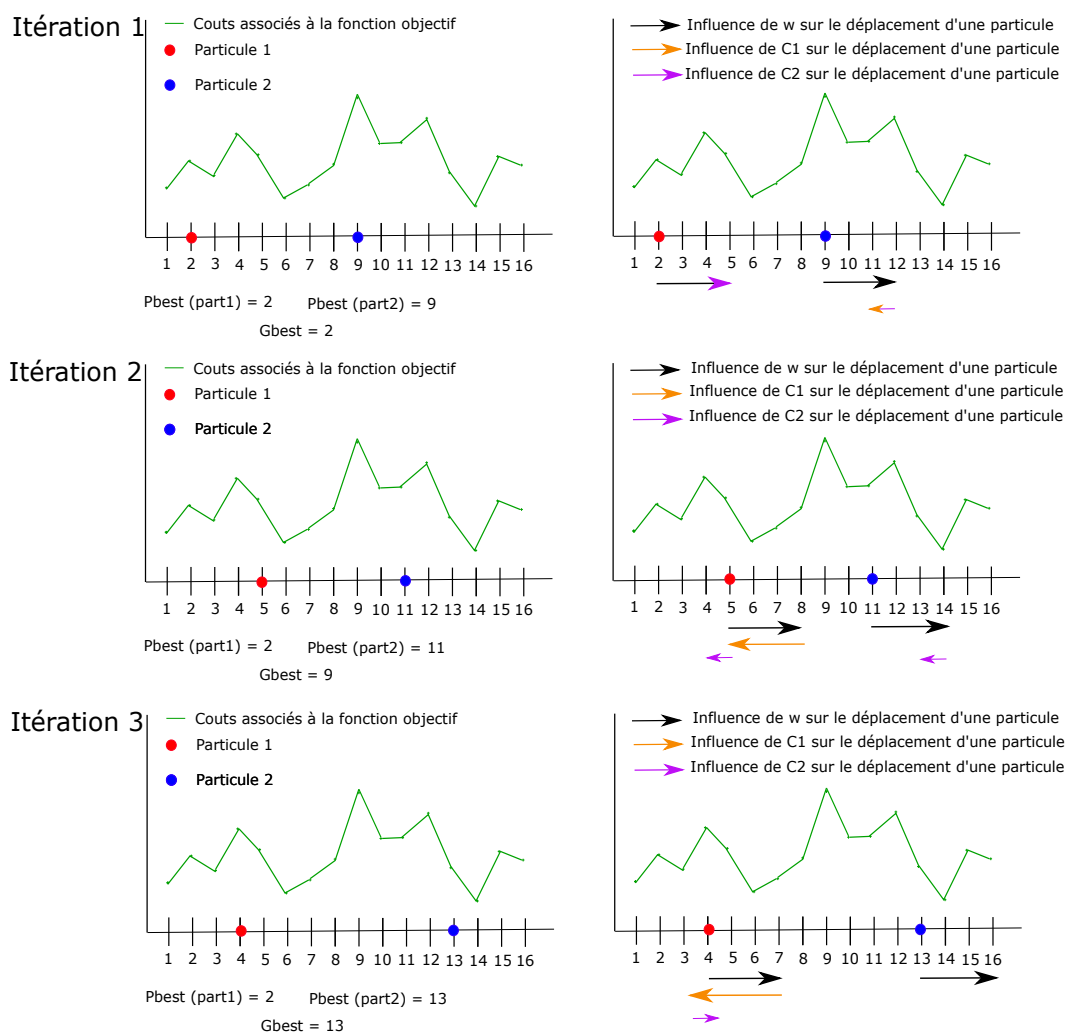


FIGURE 3.6 – Exemple d'évolution de l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire

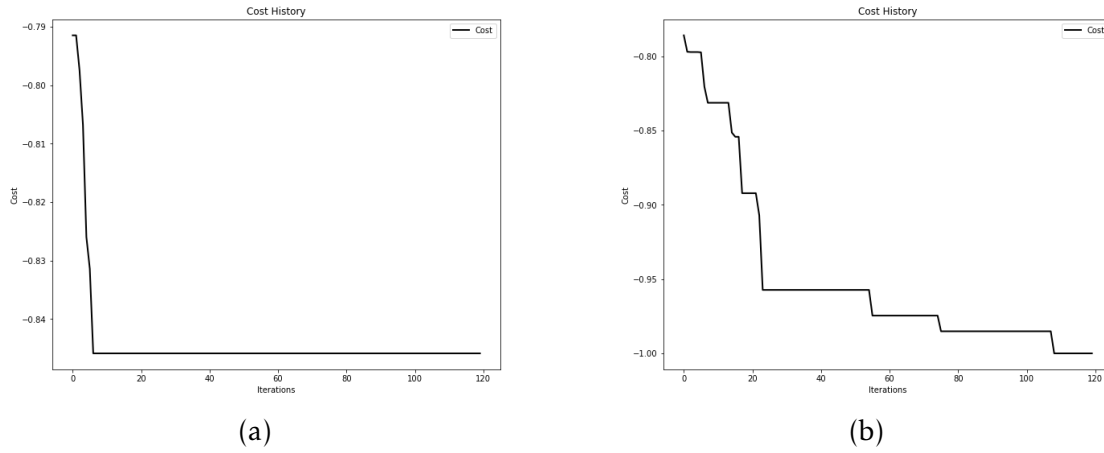


FIGURE 3.7 – Evolution du nuage de particules avec un paramétrage à convergence rapide (a) et exploratoire (b)

3.4.4 Première Étape : Optimisations individuelles

La première étape du processus de la gestion énergétique est d'effectuer une optimisation individuelle pour chaque foyer constituant la communauté. Chaque foyer se voit attribuer une part de la production photovoltaïque et va optimiser ses consommations grâce à ses moyens de flexibilité. Chaque foyer va poursuivre une stratégie de planification de flexibilité en fonction de sa sensibilité. Pour rappel, trois sensibilités individuelles ont été retenues dans le cas de cette étude 3.1.2 : les profils sensibles aux prix (qui optimiseront en fonction de la variable C_{tot}^i), à l'environnement (qui optimiseront en fonction de la variable τ_{tot}^i) et à la consommation d'énergie locale renouvelable qui optimiseront en fonction de la variable A^i .

L'idée est de déterminer les gains maximums auxquels pourrait prétendre un foyer s'il optimise seul sa consommation en fonction de ses préférences et de l'énergie solaire qu'il possède. Nous positionnons donc le foyer dans le cadre d'une opération d'autoconsommation collective telle qu'appliquée légalement avec une attribution d'énergie renouvelable par clef de répartition fixe. Chaque foyer optimisera donc ses consommations en suivant la fonction objectif 3.15.

$$\min f^i(X) = C_{tot}^i \times \rho_{price}^i - A^i \times \rho_{auto}^i + \tau_{tot}^i \times \rho_{env}^i \quad (3.15)$$

À la fin de ces optimisations, le coût financier C_{optind} , l'impact environnemental τ_{optind} et le taux d'autoconsommation (A_{optind}) de la communauté entière sont calculés. Ils permettront de les comparer aux mêmes indicateurs après optimisation collective (3.4.5) pour définir les différents gains associés à celle-ci.

3.4.5 Deuxième Étape : Optimisation collective

En parallèle des optimisations individuelles, l'agrégateur va effectuer une optimisation dite collective. L'agrégateur connaît également les estimations de consommations de la communauté pour le lendemain. Les membres déclarent les appareils qu'ils acceptent de mettre à disposition de la communauté pour optimiser les flexibilités. L'ensemble de la production photovoltaïque est considérée. L'objectif suivi par cette optimisation est de maximiser le taux d'autoconsommation et suit l'équation 3.16 :

$$\min f(X) = -A \quad (3.16)$$

Grâce aux équations 3.5, 3.10 et 3.1, il est possible de déduire les coûts financiers C_{optcol} , les impacts environnementaux τ_{optcol} et le taux d'autoconsommation A_{optcol} à la fin de l'optimisation. En les comparant aux mêmes valeurs issus des optimisations individuelles, il est possible de constater les gains du système de gestion développé dans ces travaux par rapport aux meilleurs résultats qu'auraient pu obtenir les foyers individuellement en fonction de leur sensibilité. La suite de ce chapitre permettra d'illustrer les avantages de la stratégie collective et une analyse de ces avantages sera faite.

3.5 Les bénéfices d'une gestion de l'énergie collective

Dans cette section, les avantages d'une gestion énergétique construite autour du partage d'énergie et de la coordination de flexibilité vont être présentés. Dans un premier temps, la pertinence environnementale de programmes de flexibilité sera discutée. La problématique sera ensuite abordée du point de vue technique,

notamment en étudiant l'influence du dimensionnement de la centrale PV dans le processus d'optimisation. Les avantages financiers et environnementaux de la solution proposée par rapport à un contexte d'optimisations individuelles seront ensuite illustrés par différents scénarios dont les résultats seront discutés.

3.5.1 La gestion énergétique est-elle bénéfique d'un point de vue environnemental ?

Comme évoqué en Section 3.3, l'impact environnemental des systèmes de gestion énergétique et des smart grids est souvent peu ou mal quantifié dans la littérature. Dans ces travaux de thèse, une méthodologie de quantification de ces impacts grâce à l'ACV est proposée. L'intérêt d'une gestion collective centralisée de l'énergie est de diminuer le nombre de calculateurs dans la communauté, mais les appareils nécessaires aux flexibilités conservent tout de même un impact.

Dans ce paragraphe, l'impact environnemental global de la gestion énergétique va être observé. L'ensemble des contraintes liées au système d'automatisation des flexibilités présentées en paragraphe 3.3.4 vont être intégrées dans les simulations. Pour observer l'influence de la gestion énergétique sur les impacts environnementaux, trois états vont être observés :

- **État 1** : la communauté ne possède pas de moyen de production et donc pas de système de gestion. C'est l'état initial de l'étude.
- **État 2** : la communauté possède une production PV locale mais aucun système de gestion des consommations n'est présent. Cet état permettra notamment d'observer les bénéfices de l'installation d'un système de production d'énergie renouvelable local.
- **État 3** : le système de gestion collectif associé à la source PV est utilisé dans la communauté. En introduisant les impacts des systèmes permettant la flexibilité, il sera possible d'évaluer l'intérêt environnemental d'un système de gestion énergétique.

Pour introduire l'impact des équipements d'automatisation, chaque appareil flexible de la communauté se verra attribuer un smart plug, dont l'impact journalier sur la durée de vie de l'équipement sera considéré. De même, le serveur

se verra attribuer l'impact journalier sur sa durée de vie. Les consommations électriques de ces appareils seront ajoutées aux consommations de la communauté. L'optimisation collective est effectuée tous les jours sur une année. Les calculs nécessaires à l'ensemble de ces optimisations étant très nombreux, le nombre de particules et le nombre d'itérations de l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire ont été diminués pour gagner en temps de calcul. Ici, 600 particules sont générées par jours de l'année pour 50 itérations, ce qui représente $11 \cdot 10^6$ générations de la fonction coûts. Il est donc certain que le taux d'autoconsommation maximum pour chaque jour ne soit pas toujours atteint. Le tableau 3.14 indique les scores environnementaux des trois états obtenus par cette méthode.

Score [Points ACV]	
État 1	$180,7 \cdot 10^3$
État 2	$170,9 \cdot 10^3$
État 3	$173,7 \cdot 10^3$

TABLEAU 3.14 – Score ACV annuel des trois états étudiés

Les résultats montrent que l'état 2 permet de réduire l'impact environnemental de 5,6% par rapport à l'état 1, alors que l'état 3 permet de le réduire de 4,3% en considérant une année complète. Cela signifie qu'à l'échelle d'une année entière, la pertinence d'un système de gestion de flexibilité d'un point de vue environnemental peut être discutée. Ce faible gain s'explique par le fait que, les jours de faible ensoleillement, le système de gestion n'est pas utile puisque toute la production est automatiquement absorbée par la consommation de base de la communauté.

Il n'est cependant pas possible de conclure que le système de gestion provoque une augmentation de l'impact environnemental. Comme expliqué auparavant, dans le cadre de cette étude de sensibilité, il est probable que le système n'ait pas permis la meilleure optimisation pour chaque journée.

En observant un jour de faible ensoleillement (Figure 3.8), on peut s'apercevoir que les consommations après optimisation (Figure 3.8 (b)) ont été déplacées par rapport à l'état initial (Figure 3.8(a)), puisque l'objectif de l'optimisation est

de maximiser l'autoconsommation. L'initialisation des particules peut retourner un taux d'autoconsommation de 100 % avec un agencement différent des appareils. L'impact environnemental de l'énergie du réseau varie au cours du temps. En ajoutant les consommations électriques des appareils ainsi que leur impact environnemental journalier, le score environnemental après optimisation augmente de 2,3 %. Cette incertitude les jours de faible ensoleillement peut expliquer l'augmentation du score environnemental sur l'année.

Si un jour ensoleillé est considéré, l'état 3 permet de réduire l'impact environnemental de 5 % par rapport à l'état 2. Éteindre l'ensemble des appareils d'automatisation des flexibilités, et ne pas suivre les résultats de l'optimisation collective les jours où le talon de consommation est haut et la production basse, pourrait être la solution pour s'assurer que le système de gestion permet de diminuer l'impact environnemental à long terme d'une communauté. Il est également important de souligner que l'étude se place dans un contexte de mix énergétique spécifique à la France et que les résultats pourraient être différents dans d'autres contextes énergétiques. Enfin, il est nécessaire de rappeler que le score environnemental utilisé dans cette étude est basé sur une pondération des différents impacts environnementaux qui peut être discutée en fonction des contextes locaux. La conclusion qui peut être tirée est qu'il est impératif de considérer la question de l'impact environnemental dans les travaux de recherche incluant des smart grids. Les systèmes de management énergétique, bien qu'efficaces en termes de gestion de l'énergie, peuvent devenir contre-productifs au niveau environnemental si leur impact n'est pas correctement évalué. Une méthodologie standardisée pour évaluer ces impacts est donc nécessaire pour garantir que les solutions mises en œuvre sont véritablement bénéfiques à long terme d'un point de vue environnemental.

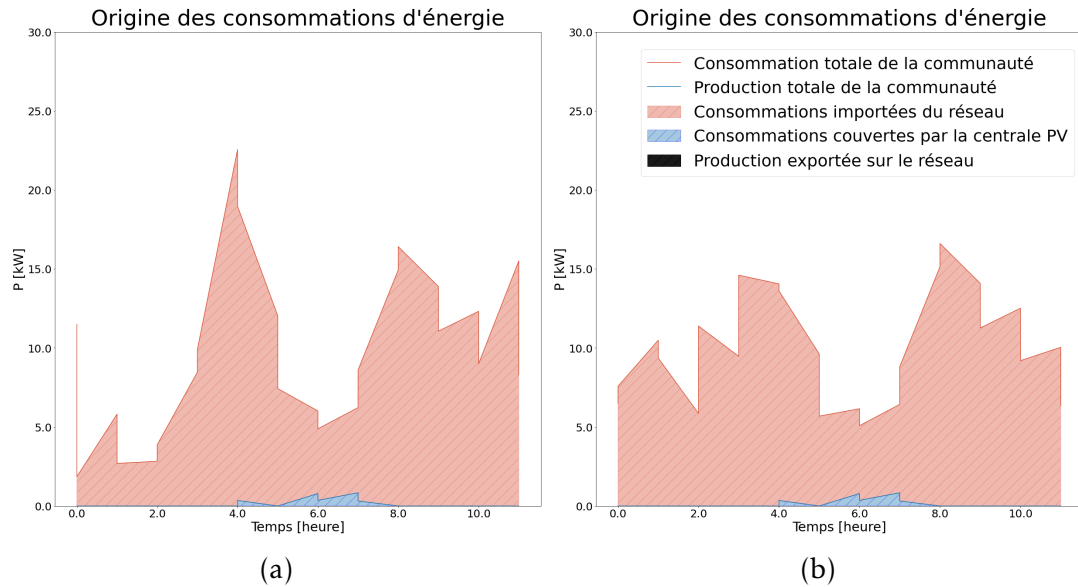


FIGURE 3.8 – Origine des consommations électriques de la communauté avant (a) et après optimisation collective (b) (jour d'hiver)

3.5.2 Répondre aux problématiques techniques : l'influence de la production

Dimensionnement de la centrale PV

La simulation des données énergétiques d'une communauté a permis d'identifier des paramètres techniques influençant la gestion énergétique. Trois paramètres sont particulièrement importants pour le processus d'optimisation :

- Les consommations globales des foyers, car elles définissent les besoins énergétiques.
- Les flexibilités des foyers, car les appareils flexibles permettent d'optimiser les consommations dans le temps.
- La production d'énergie renouvelable locale car elle permet de couvrir une partie des besoins énergétiques.

En l'absence de cas réels à étudier, nous avons choisi de nous concentrer sur l'influence de la production locale. Premièrement, parce que les données de consommation utilisées, et donc la simulation de la consommation énergétique

d'appareils flexibles, dépendent du logiciel CREST. Une étude plus poussée de ces facteurs nécessiterait des développements supplémentaires liés au modèle, en introduisant plus de profils de consommations énergétiques de certains appareils. Deuxièmement, les travaux de [29] ont déjà apporté des éléments de réponse sur l'influence de la flexibilité sur la gestion énergétique. Ces travaux ont permis de prouver que le déplacement d'appareils de flexibilité en fonction des idéaux-types de consommateurs d'énergie, permettent d'alléger le réseau électrique tout en respectant la satisfaction des foyers. Enfin, étudier l'influence de la production présente un double avantage : comprendre plus en détail la réaction du système en fonction de l'énergie disponible et obtenir des réponses chiffrées sur le dimensionnement d'une centrale photovoltaïque en cas d'expérimentation réelle. En effet, la centrale photovoltaïque est souvent le dernier élément ajouté à un réseau électrique, les consommations existant déjà et les flexibilités étant connues. Dans le cas où l'installation photovoltaïque n'existe pas, cette étude sera utile pour éviter de surdimensionner ou de sous-dimensionner la centrale.

Une étude de sensibilité est menée pour déterminer la puissance crête² (P_c^{opt}). Pour cette étude, la sensibilité "autonome" ($\rho^i=(0,1,0)$) est attribuée à tous les membres de la communauté. L'étude est réalisée de 5 kWc à 30 kWc avec une itération chaque kWc.

Ainsi, en tenant compte des consommations et de la flexibilité de la communauté, il est possible de déterminer le dimensionnement optimal pour obtenir les meilleurs gains en termes d'autoconsommation grâce à l'optimisation collective, comparée aux optimisations individuelles. Cette approche maximise la consommation d'énergie locale en coordonnant les flexibilités. L'optimisation est réalisée lors de la journée présentant la plus haute irradiation annuelle.

Le taux d'autoconsommation de la communauté après optimisations individuelles et collectives pour chaque niveau de puissance crête installée est présenté dans la Figure 3.9. La Figure 3.10 montre la courbe de la différence des taux d'autoconsommation de la communauté à la fin des deux types d'optimisation. Des fluctuations sont visibles sur cette deuxième courbe, car, comme évoqué

2. La puissance crête est une mesure standardisée de la puissance maximale qu'un module photovoltaïque peut produire dans des conditions idéales de test (STC pour Standard Test Conditions) : une irradiance de $1000 W/m^2$, une température de surface de cellule de 25C et un coefficient de masse d'air de AM1.5.

précédemment, le processus d'optimisation peut retourner des minimums locaux éloignés du minimum global. La courbe prouve qu'il existe une puissance crête $P_c^{opt} = 15\text{kWc}$, pour laquelle la différence $A_{optcol} - A_{optind}$ est maximale pour le jour le plus ensoleillé de l'année. Cette valeur est retenue pour la suite des simulations.

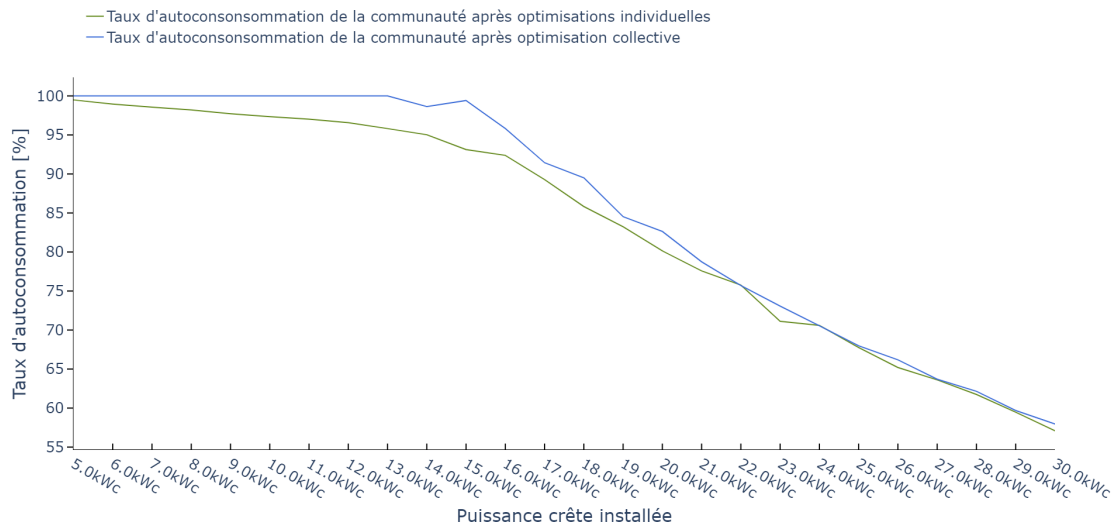


FIGURE 3.9 – Évolution des taux d'autoconsommations de la communauté après optimisation individuelles et collective en fonction des différentes puissances crêtes de la centre photovoltaïque

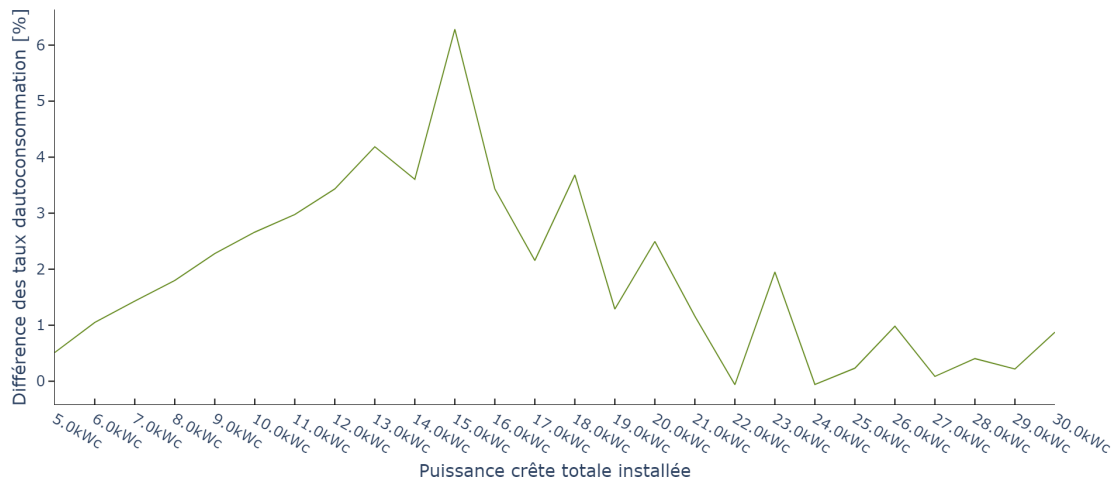


FIGURE 3.10 – Différence des taux d'autoconsommation de la communauté après optimisations individuelles et collective ($A_{optcol} - A_{optind}$)

Test du modèle sur plusieurs jours types

L'optimisation est ensuite effectuée sur trois jours types de l'année, avec un pas de temps de 30 minutes pour l'optimisation des consommations. La sensibilité individuelle "autonome" ($\rho^i=(0,1,0)$) est toujours considérée pour chaque foyer de la communauté. Une comparaison des coûts, de l'impact environnemental et du taux d'autoconsommation après optimisations individuelles et collectives est établie. Le Peak-to-Average Ratio (PAR) et la Squared Euclidean Distance (SED) de l'énergie consommée sur le réseau sont également observés pour déterminer l'avantage de la gestion énergétique pour les Gestionnaire du Réseau de Distribution (GRD). Les 3 journées étudiées sont celles où l'irradiation est maximale, moyenne et minimale de l'année.

La figure 3.11 présente les consommations et la production de la communauté en hiver après optimisations individuelles (3.11(a)) et collective (3.11(b)). On peut observer que la production n'est pas suffisante pour différencier les deux optimisations et l'état initial avant toute optimisation. Les taux d'autoconsommation respectifs A_{optind} et A_{optcol} sont de 100%, tout comme celui avant toute optimisation, et le déplacement de flexibilité ne génère aucun bénéfice de l'optimisation collective par rapport à l'optimisation individuelle. La facture

énergétique (C_{tot}) et le score environnemental (τ_{tot}) augmentent légèrement, respectivement de 2.3% et de 0.3%. Dans ce cas précis, l'optimisation individuelle en fonction des préférences des foyers semble plus avantageuse, car le système de partage de production et de coordination de consommation ne génère aucun avantage en raison du manque d'ensoleillement.

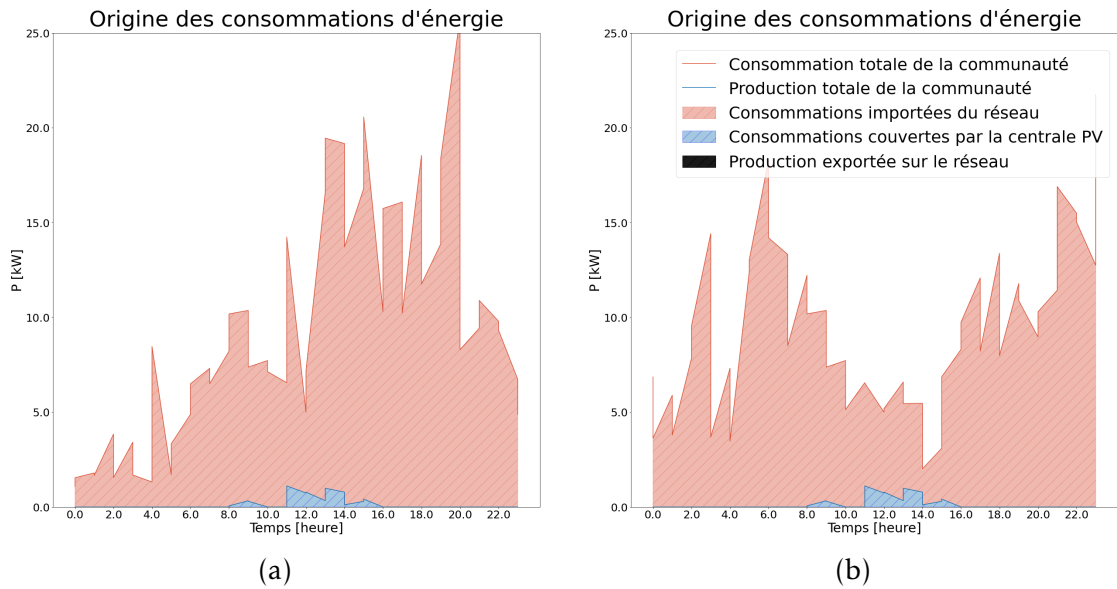


FIGURE 3.11 – Origine des consommations électriques de la communauté après optimisation individuelle (a) et collective (b) (jour d'irradiation minimale)

La figure 3.12 présente les consommations et la production de la communauté sur la journée où la production solaire est la plus haute de l'année, après optimisations individuelles (3.12(a)) et collective (3.12(b)). Cette courbe met en évidence l'avantage de la coordination des flexibilités. Grâce à l'optimisation collective, l'énergie injectée est limitée. En effet, les optimisations individuelles génèrent des pics de consommation pendant la période la plus ensoleillée de la journée. Chaque foyer, pour maximiser son autoconsommation, place les appareils à forte puissance aux horaires où la production est maximale. En revanche, l'optimisation collective permet de placer l'ensemble des appareils de manière à suivre au plus près la courbe de production. Ainsi, le taux d'autoconsommation de la communauté augmente de 5,1% avec l'optimisation collective par rapport aux optimisations individuelles, et de 49% par rapport à la situation initiale,

atteignant respectivement 97,3% et 92,2% et 48.3%. Les coûts et les impacts environnementaux diminuent respectivement de 14,7% et de 6,4%. Cela s'explique par un coût et un impact environnemental de l'énergie provenant du réseau plus élevés en journée ; les pics générés par les optimisations individuelles obligent la communauté à acheter de l'énergie à un coût et un impact environnemental importants sur la journée et à en injecter à d'autres moments de la journée représentant une perte de $C_{auto} - C_{inj}$ (3.2).

D'un point de vue réseau, le PAR augmente légèrement par rapport à l'état initial sans optimisation, avec une augmentation de 3,5%. Les deux types d'optimisation sont équivalents sur ce paramètre, l'optimisation collective générant une augmentation du PAR de 3,2%. Cependant, cette augmentation doit être interprétée avec précaution. En effet, augmenter le taux d'autoconsommation fait diminuer fortement les consommations couvertes par l'énergie du réseau de distribution. Les pics générés par des appareils non flexibles dans la journée sont alors relativement plus élevés par rapport à la moyenne.

Le SED permet de justifier cette hypothèse : les optimisations individuelles réduisent ce paramètre de 81 % par rapport à l'état initial, et l'optimisation collective le diminue de 4,5 % supplémentaires par rapport aux optimisations individuelles. Cela signifie que la répartition des consommations sur la journée est beaucoup plus homogène.

En conclusion, en augmentant le taux d'autoconsommation, les consommations d'énergie provenant du réseau diminuent fortement, réduisant la moyenne des consommations. Ainsi, les pics sont plus importants par rapport à la moyenne, mais la contrainte sur le réseau diminue en raison d'une moindre utilisation de celui-ci. La figure 3.13 illustre les résultats présentés concernant les contraintes réseau.

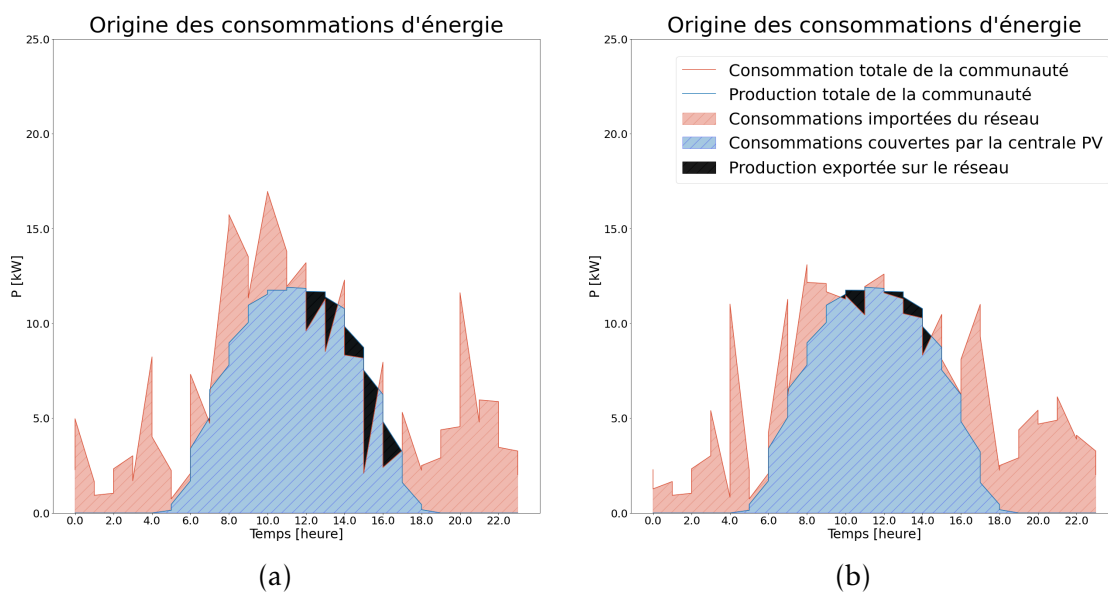


FIGURE 3.12 – Origine des consommations électriques de la communauté après optimisation individuelle (a) et collective (b) (jour d'irradiation maximale)

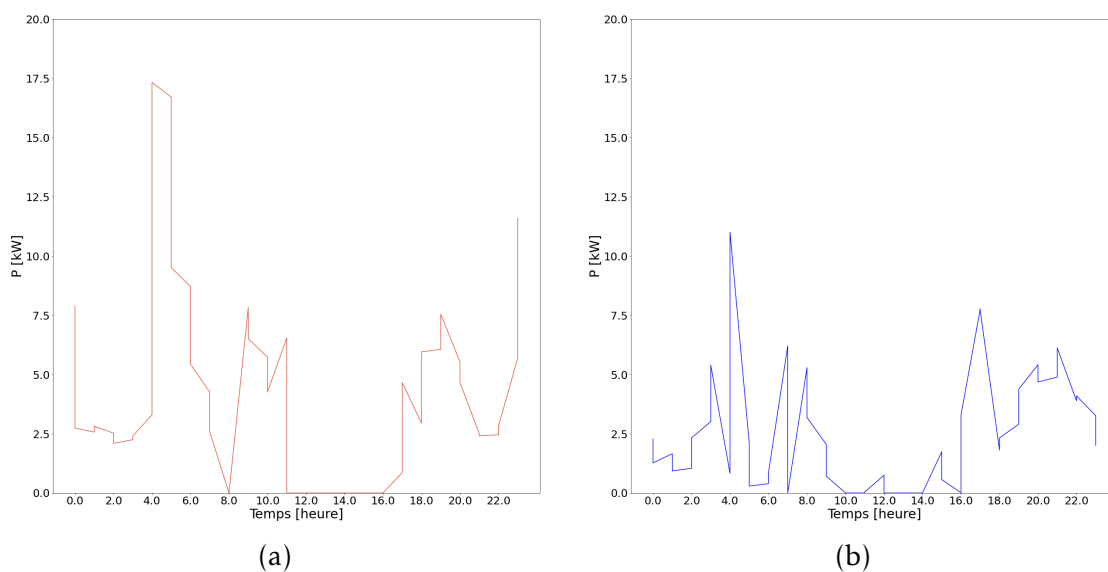


FIGURE 3.13 – Consommations couvertes par le réseau avant toute optimisation (a) et après optimisation collective (b)

Enfin les résultats pour une journée où la production se rapproche de la moyenne annuelle est présentée dans la Figure 3.14. La tendance reste la même

que pour la journée à forte production solaire.

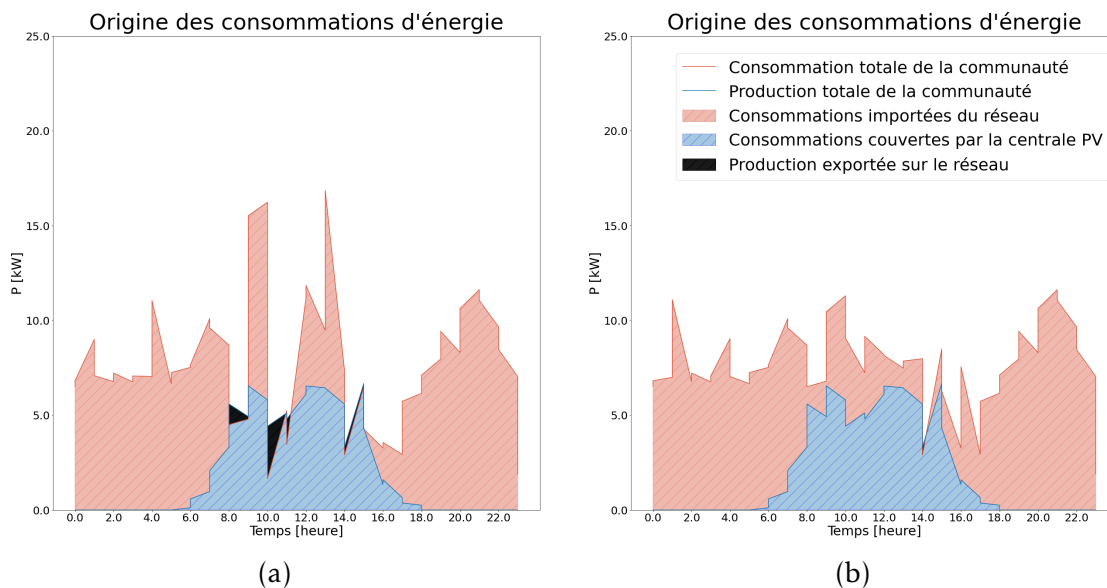


FIGURE 3.14 – Origine des consommations électriques de la communauté après optimisation individuelle (a) et collective (b) avec production moyenne

Le taux d'autoconsommation de la communauté augmente de 5 % avec l'optimisation collective par rapport aux optimisations individuelles, et de 46% par rapport à la situation initiale, atteignant respectivement 98 %, 93 % et 53 %. Les écarts restent semblables à la situation précédente, puisque les stratégies individuelles et collectives sont les mêmes. Les coûts et les impacts environnementaux diminuent respectivement de 13 % et de 5,3 %. Enfin, entre les deux types d'optimisation, le PAR diminue de 13,7 % et le SED de 50,4 %. Les gains pour le réseau sont ici plus importants, car le seul profil individuel retenu est le profil autonome, qui optimise ses consommations pour consommer le plus d'énergie locale possible. Cette stratégie génère des pics importants durant les heures ensoleillées avec les optimisations individuelles. Les puissances appelées des plus gros appareils de flexibilité (BEC, VE) restent semblables et causent un dépassement plus important de la courbe de production.

Conclusion sur l'importance de la production

Le tableau 3.15 résume les gains obtenus grâce à l'optimisation collective sur les optimisations individuelles présentées ci dessus.

Jour	Irradiation min	Irradiation max	Irradiation moy
Autoconsommation	0%	+5.1%	+5%
Coûts	+2.3%	-14.7%	-13%
Impact environnemental	+0.3%	-6.4%	-5.3%
PAR (PAR)	-15,4	-0.3%	-13.7%
SED (SED)	-50.4	-4.5%	-50.4%

TABLEAU 3.15 – Gains obtenus grâce à l'optimisation collective par rapport aux optimisations individuelles

La quantité d'énergie renouvelable locale disponible est l'un des facteurs les plus importants dans la gestion énergétique proposée. En effet, un sous-dimensionnement de la production annule les bénéfices d'une gestion collective de l'énergie, puisque c'est l'autoconsommation qui permet de différencier les stratégies. Une production insuffisante empêche la coordination des appareils flexibles, puisque la totalité de l'énergie produite est directement absorbée par les consommations avant toute optimisation. À l'inverse, une production trop importante limite également cette coordination, car l'ensemble des consommations pouvant être autoconsommées seront totalement couvertes par la production. Ce sur-dimensionnement obligera de plus la communauté à injecter de l'énergie sur le réseau, générant des pertes financières et des contraintes supplémentaires sur le réseau de distribution.

Pour la suite des travaux, le jour où la production est la plus élevée sera retenu. En considérant d'autres sensibilités que le profil autonome, les stratégies suivies par les optimisations individuelles vont différer de l'objectif de la communauté. Ces stratégies pourront augmenter la part d'énergie injectée sur le réseau si elles sont suivies individuellement (voir 3.5.3). Une production maximale permettra de discuter de l'influence de cette énergie injectée sur les coûts associés aux consommations d'électricité et à leur impact environnemental.

3.5.3 L'influence des sensibilités individuelles des foyers

Dans ce travail de thèse, il est considéré que les foyers sont engagés dans une communauté pour poursuivre trois buts distincts en liens avec les idéaux types retenus : diminuer la facture énergétique, diminuer l'empreinte environnementale, augmenter l'autonomie de la communauté. L'avantage de l'autoconsommation collective va donc être discuté en considérant différentes répartitions de profils dans la communauté. Quatre scénarios vont ainsi être étudiés :

- Scénario 1 : La communauté n'est composée que de profils dits autonomes ($\rho^i=(0,1,0)$). Celui-ci permettra de tirer les avantages du collectif sur les stratégies individuelles sur la question d'autonomie de la communauté.
- Scénario 2 : La communauté n'est composée que de profils dits économes ($\rho^i=(1,0,0)$). Celui-ci permettra de tirer les avantages du collectif sur les stratégies individuelles sur les questions financières de la communauté.
- Scénario 3 : La communauté n'est composée que de profils dits éco-sensibles ($\rho^i=(0,0,1)$). Celui-ci permettra de tirer les avantages du collectif sur les stratégies individuelles sur la question des impacts environnementaux de la communauté.
- Scénario 4 : La communauté sera composée de profils équitablement répartis ($\rho^i = (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$). Celui-ci permettra de discuter de la robustesse du système collectif dans un contexte de pluralité d'objectifs.

Scénario 1

Ce scénario est présenté en premier car ses conclusions ont déjà été tirées précédemment (3.5.2). L'optimisation collective permet d'augmenter le taux d'autoconsommation de la communauté tout en diminuant ses coûts et ses impacts environnementaux. Le Tableau 3.16 présente l'ensemble des indicateurs après optimisations individuelles et collective.

	A [%]	C_{tot} [€]	τ_{tot} [Pts]	PAR	SED [kW^2]
Collectif	97.3	13.3	331.8	4.5	75.3
Individuel	92.2	15.3	353	4.5	78.7

TABLEAU 3.16 – Indicateurs observés après optimisations individuelles et collective

La première conclusion à tirer, qui sera démontrée par la suite, est que, dans les hypothèses retenues, poursuivre une stratégie de maximisation de l'autoconsommation permet à la communauté de gagner sur tous les points.

Une précision doit être apportée concernant la couverture des consommations de la communauté. Si chaque foyer se voit attribuer la même production photovoltaïque, qu'il n'y a pas de structure de gestion d'énergie à l'échelle de la communauté, et que chacun souhaite augmenter son indépendance énergétique vis-à-vis du réseau électrique, alors 60% des consommations de la communauté sont couvertes par l'énergie locale. Avec une gestion collective de l'énergie, ce chiffre monte à 63%. Ce pourcentage est inférieur à la différence du taux d'autoconsommation car il prend en compte l'ensemble des consommations de la communauté, alors que le taux d'autoconsommation indique la quantité de production absorbée.

Ce chiffre s'explique par la coordination des appareils pouvant être déplacés et par la puissance nominale qu'ils absorbent. En effet, considérer la somme des productions de la communauté permet d'avoir suffisamment de puissance pour couvrir les flexibilités les plus importantes. Si la stratégie collective est ramenée à l'échelle individuelle, le taux d'autoconsommation diminue à nouveau en raison de la problématique de la puissance appelée. Il est donc admis ici que si la communauté augmente sa part d'énergie locale consommée dans sa globalité, alors chaque individu souhaitant poursuivre un objectif d'autonomie sera satisfait. Bien sûr, cela pourrait être discuté dans le cadre d'une individualisation de la satisfaction.

Scénario 2

Dans ce scénario, chaque participant de la communauté souhaite réduire sa facture énergétique ($\rho^i=(1,0,0)$). Pour démontrer l'efficacité de la gestion d'énergie collective, il sera considéré que chaque foyer va optimiser individuellement ses consommations d'énergies dans l'objectif d'obtenir le plus bas coût énergétique. Les mêmes hypothèses d'attribution d'énergie locale sont considérées. Ainsi, il sera possible de déterminer ce qu'un foyer peut obtenir de mieux d'un point de vue financier s'il s'engage seul dans un programme de flexibilité. L'objectif de la communauté reste le même, consommer le maximum d'énergie produite localement. Pour mieux comprendre les dynamiques de ce scénario, la Figure 3.15 présente l'évolution du coût de l'énergie sur la journée étudiée avec les tarifs définis en 3.2.

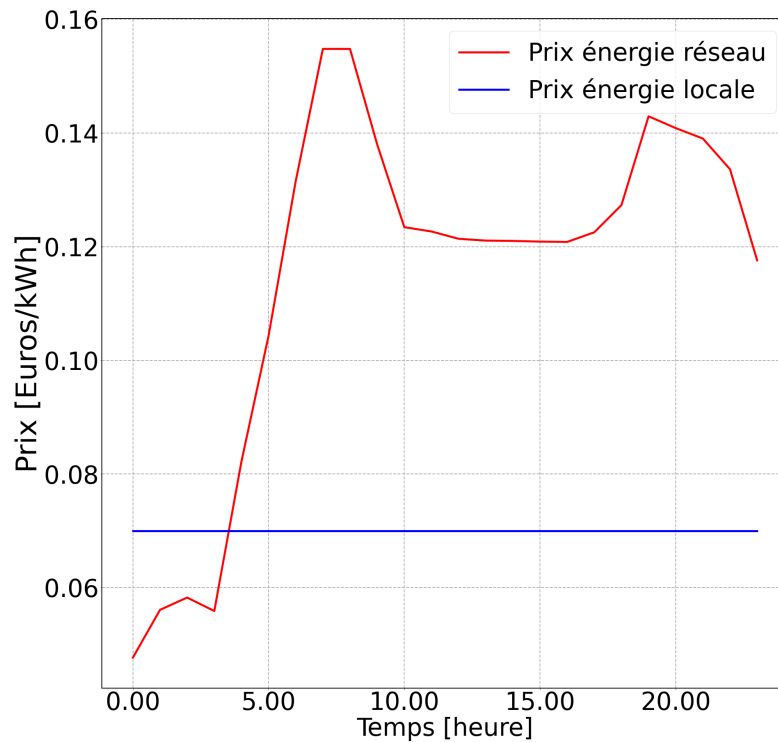


FIGURE 3.15 – Prix de l'énergie sur la journée étudiée (C_{grid} , C_{auto})

La Figure 3.16 présente les consommations optimisées après les optimisations individuelles (3.16(a)) et après l'optimisation collective (3.16(b)). Le Tableau

3.17 présente l'ensemble des indicateurs après optimisations individuelles et collective.

	A [%]	C_{tot} [€]	τ_{tot} [Pts]	PAR	SED [kW^2]
Collectif	97.3	13.3	331.8	4.5	75.3
Individuel	51.1	14	376.7	8.5	923.6

TABLEAU 3.17 – Indicateurs observés après optimisations individuelles et collective (Scénario 2)

Dans ce scénario, le taux d'autoconsommation de la communauté augmente de 46.2 % entre les deux types d'optimisation. Les coûts et les impacts environnementaux diminuent quant à eux de respectivement 5% et de 12%. Enfin, d'un point de vue impact réseau, le PAR diminue de 47% et le SED diminue de 92%.

Dans le cadre des optimisations individuelles, les très bas prix de l'énergie entre minuit et 4h du matin incitent les foyers à programmer leurs flexibilités durant ces heures-là, notamment les dispositifs à très forte puissance tels que les VE. Ceci explique les pics de consommation à ces horaires et donc une contrainte accrue sur le réseau. En effet, il est préférable, individuellement, d'injecter un peu plus d'énergie sur le réseau plutôt que de payer l'énergie aux prix élevés du milieu de journée. Une forte puissance de consommation risque de dépasser la courbe de production allouée au foyer, entraînant un coût supplémentaire pour tout dépassement de cette production.

La mise en commun de la production permet d'éviter ces dépassements et la coordination des flexibilités limite l'injection, représentant une perte économique (comme expliqué en 3.2). En limitant l'injection et en réduisant les consommations couvertes par le réseau, l'optimisation collective permet de diminuer la facture énergétique globale de la communauté. Le prochain chapitre sera dédié à la redistribution des gains, augmentant ainsi la satisfaction individuelle de chaque foyer.

Scénario 3

Dans ce scénario, chaque participant de la communauté souhaite réduire son empreinte environnementale ($\rho^i=(0,0,1)$). Ainsi, chaque foyer optimisera ses

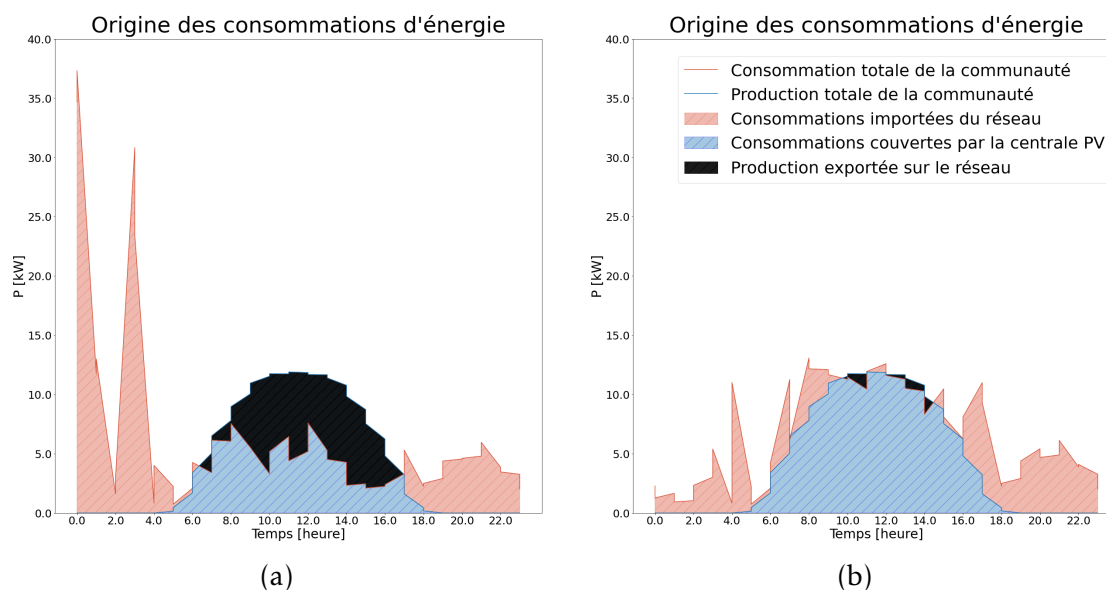


FIGURE 3.16 – Origine des consommations électriques de la communauté après optimisation individuelle sur le prix (a) et collective (b)

flexibilités pour réduire son score environnemental. La Figure 3.17 représente l'évolution du score environnemental de l'énergie circulant sur le réseau en fonction du mix énergétique à chaque instant de la journée, déduit de la base de donnée ECO2mix de RTE [119]. La figure 3.18 représente quant à elle les consommations d'énergies résultant des deux optimisations.

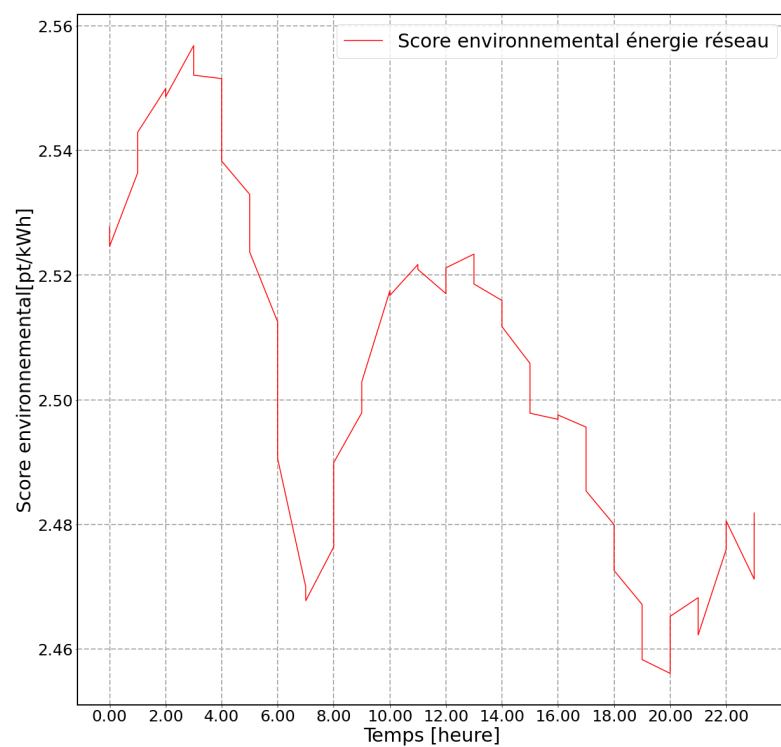


FIGURE 3.17 – Evolution de l'impact environnemental de l'énergie circulant sur le réseau sur une journée

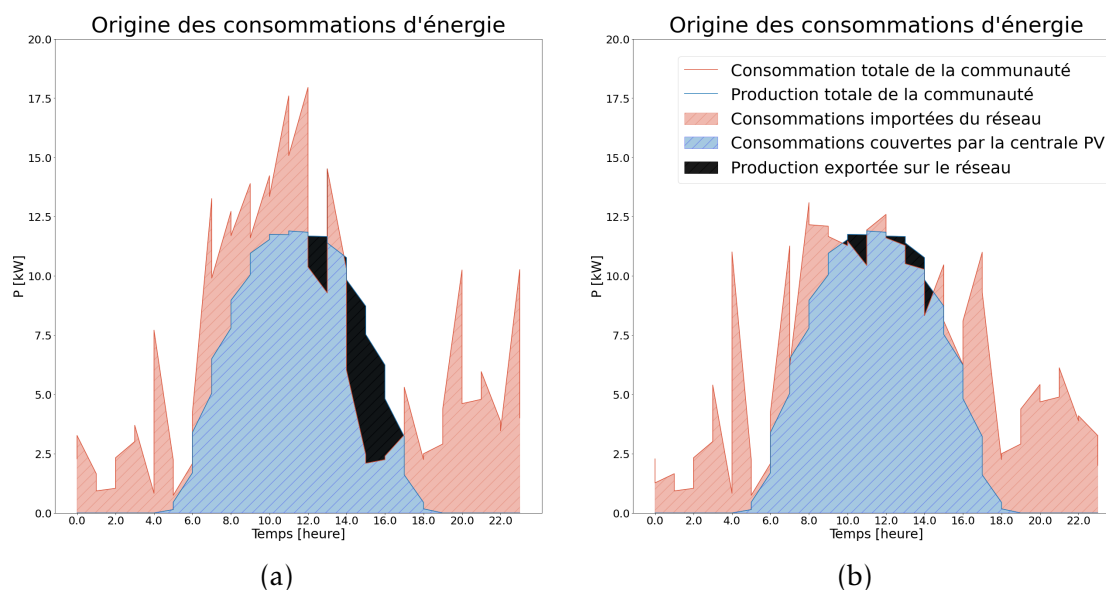


FIGURE 3.18 – Origine des consommations électriques de la communauté après optimisations individuelles sur l'impact environnemental (a) et collective (b)

Le Tableau 3.18 présente l'ensemble des indicateurs après optimisations individuelles et collective.

	A [%]	C_{tot} [€]	τ_{tot} [Pts]	PAR	SED [kW^2]
Collectif	97.3	13.3	331.8	4.5	75.3
Individuel	87.1	15.2	354.1	3.33	80

TABLEAU 3.18 – Indicateurs observés après optimisations individuelles et collective (Scénario 3)

Dans ce scénario, le score environnemental de l'énergie circulant sur le réseau est toujours supérieur au score environnemental de l'énergie PV locale. Ainsi, les optimisations individuelles vont poursuivre un objectif similaire à celui des profils autonomes. Le taux d'autoconsommation de la communauté augmente de 10,2% entre les deux types d'optimisations. Les coûts et les impacts environnementaux diminuent quant à eux de respectivement 14,2% et de 6,4%. Enfin, d'un point de vue impact réseau, le PAR augmente de 26% et le SED diminue de 6,3%. Concernant ces deux indicateurs, l'explication de leur évolution a été

interprétée en 3.5.2 dans le cadre des résultats où les objectifs individuels sont liés au profil autonome.

Ces résultats confirment en partie l'intérêt de considérer une unité fonctionnelle de l'énergie basée sur l'énergie transmise aux consommateurs plutôt que sur l'énergie produite, comme cela est souvent simplifié. En effet, pour l'énergie locale, seuls les impacts liés au réseau de basse tension (BT) sont pris en compte, tandis que pour les impacts du mix énergétique du réseau, les impacts de l'ensemble de la chaîne de transmission ainsi que ceux de la source de production sont considérés.

Cependant, il est important de noter que l'appoint d'un réseau global pour subvenir aux besoins énergétiques lors des périodes de moindre ensoleillement sera toujours nécessaire. Ces résultats visent à présenter une première méthodologie de quantification de l'impact environnemental des consommations d'une communauté énergétique. Cette méthodologie devra être affinée dans de futurs travaux pour évaluer l'impact du déploiement de sources d'énergie sur un réseau BT, en considérant la quantité d'énergie circulant sur le réseau nécessaire pour couvrir l'ensemble des consommations.

L'objectif des recherches portant sur les réseaux électriques est d'anticiper les changements techniques et économiques liés aux futures évolutions des usages énergétiques. Il est donc intéressant de quantifier ces évolutions d'un point de vue environnemental pour confirmer ou non les bénéfices de l'évolution des réseaux sur ce paramètre.

Scénario 4

Le dernier scénario étudié sur la thématique des répartitions de profils de la communauté est celui d'une répartition homogène des profils dans la communauté. Les profils sont répartis aléatoirement au sein des participants. Le Tableau 3.19 présente la répartition de ces profils.

Foyer	H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
Profile	env	env	auto	auto	eco	eco	env	auto	eco

TABLEAU 3.19 – Répartition des profils dans la communauté

La figure 3.19 représente les consommations d'énergie électrique résultant des deux optimisations. L'ensemble des stratégies présentées dans les 3 scénarios précédents se retrouvent dans celui-ci. Des pics surviennent la nuit avec les optimisations individuelles, mais ceux-ci sont moins importants que lors du scénario 2 car seulement un tiers de la communauté cherche à optimiser sur le prix. Les profils sensibles à l'environnement et les autonomes planifient leurs flexibilités aux heures les plus ensoleillées, créant des pics, mais moins importants que précédemment. La répartition des flexibilités en fonction des profils est également à prendre en compte. Dans cet exemple, 3 foyers sont équipés de VE et deux d'entre eux se sont vu attribuer un profil sensible au prix. C'est pour cela que les pics sont importants la nuit et l'augmentation du taux d'autoconsommation limitée.

Le Tableau 3.20 présente l'ensemble des indicateurs après optimisations individuelles et collective.

	A [%]	C_{tot} [€]	τ_{tot} [Pts]	PAR	SED [kW^2]
Collectif	97.3	13.3	331.8	4.5	75.3
Individuel	74.2	14.3	365.3	5.5	279.3

TABLEAU 3.20 – Indicateurs observés après optimisations individuelles et collective (Scénario 4)

Le taux d'autoconsommation de la communauté augmente de 23% entre les deux types d'optimisation. Les coûts et les impacts environnementaux diminuent quant à eux de respectivement 7% et de 9.2%. Enfin, d'un point de vue impact réseau, le PAR diminue de 19% et le SED diminue de 73%.

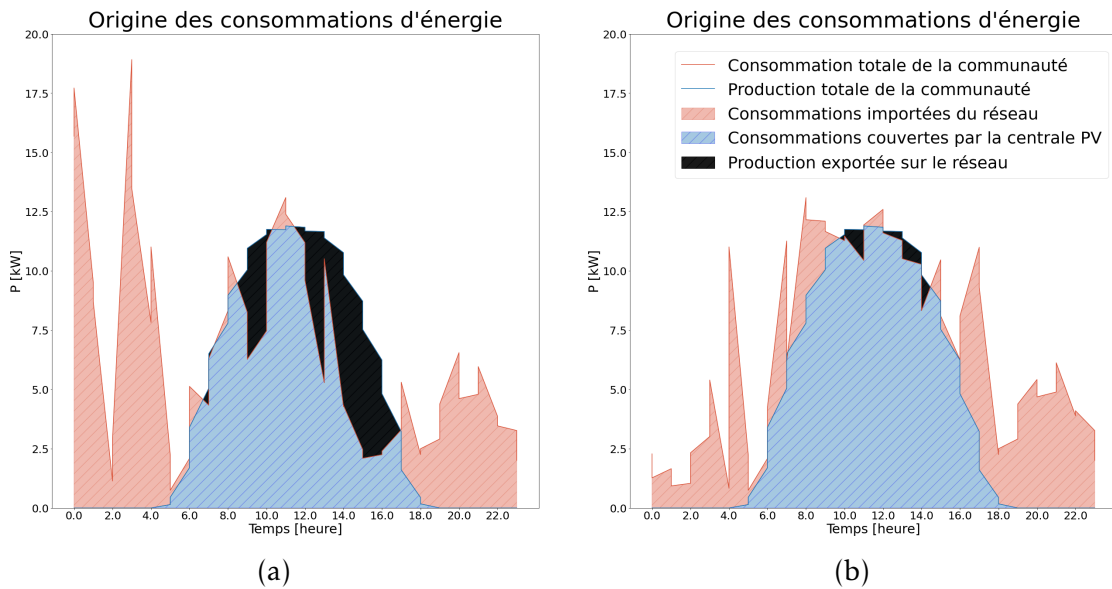


FIGURE 3.19 – Origine des consommations électriques de la communauté après optimisations individuelles avec répartition homogène des profils (a) et collective (b)

Conclusion sur l'importance de la répartition des profils

La répartition des profils au sein de la communauté ne change pas la méthode de gestion collective en elle-même. Cependant, une répartition différente aurait pu influencer la satisfaction des membres de la communauté. Il était nécessaire de vérifier que la gestion collective puisse être bénéfique sur différents points, indépendamment des motivations individuelles de ses membres.

Il est possible de conclure qu'avec les hypothèses présentées dans l'ensemble de ce chapitre, et peu importe les motivations des foyers à participer à un programme de gestion énergétique, la communauté augmente son taux d'auto-consommation, réduit son impact environnemental et sa facture énergétique. Les contraintes sur le réseau sont également moins importantes grâce à une baisse globale des besoins énergétiques que celui-ci doit couvrir.

Les résultats démontrent notamment que, suivant la répartition des profils au sein de la communauté, les stratégies d'optimisation individuelle diffèrent significativement. Des pics de consommation apparaissent si chaque foyer optimise individuellement ses consommations. Ces pics peuvent apparaître la

duit dans le cas de foyers optimisant leurs coûts, tandis que les foyers axés sur l'autoconsommation et l'impact environnemental planifient leurs consommations pendant les périodes les plus ensoleillées. L'optimisation collective aide à équilibrer ces divers comportements, en concentrant et coordonnant les flexibilités pendant les périodes de production locale, tout en réduisant les coûts et l'impact environnemental de la communauté.

Le tableau 3.21 résume les gains potentiels de l'optimisation collective par rapport aux optimisations individuelles, en fonction de la répartition des sensibilités individuelles au sein de la communauté. Dans ce tableau une valeur positive pour le taux d'autoconsommation et des valeurs négatives sur les autres lignes indiquent des gains obtenus par l'optimisation collective par rapport aux optimisations individuelles. Les paramètres d'optimisation individuelle pour chaque scénario influencent les différences observées entre les scénarios.

Par exemple, il est logique que, dans le scénario 1, le taux d'autoconsommation après optimisation collective augmente moins que dans les autres scénarios. En effet, lorsque la communauté est composée uniquement de profils autonomes, chaque foyer optimise déjà ses consommations pour maximiser son propre taux d'autoconsommation. Par conséquent, l'écart entre les deux types d'optimisation est nécessairement plus faible. Cependant, il est important de noter que même dans ce cas, l'optimisation collective permet une légère augmentation du taux d'autoconsommation de la communauté par rapport à une optimisation individuelle. De plus, l'optimisation collective contribue également à alléger la charge du réseau, réduire la facture énergétique et diminuer les impacts environnementaux de la communauté.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Taux d'autoconsommation	+5%	+46%	+10,2%	+13%
Coûts	-13%	-5%	-14,2%	-7,2%
Impacts environnementaux	-5,3%	-12%	-6,4%	-9,3%
PAR	-0,3%	-47%	+26%	-19%
SED	-4,5%	-92%	-6,3%	-73%

TABLEAU 3.21 – Résumé des gains obtenus par l'optimisation collective sur les optimisations individuelles selon les scénarios

3.6 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de préciser la construction des données dans ce travail de thèse. Les données sont toutes issues de simulations provenant de logiciels open source. L'ensemble des hypothèses retenues sur leur construction a donc été présenté. Le processus d'optimisation et la méthodologie retenue ont également été présentés. Cette méthodologie repose tout d'abord sur une mise en commun de production et la coordination d'un ensemble de flexibilité dans la communauté. L'objectif du groupe est de maximiser la quantité d'énergie consommée provenant de la production d'énergie renouvelable locale. Le travail étant multidisciplinaire, il a été supposé que les objectifs individuels des foyers pouvaient diverger par rapport à l'objectif de la communauté. Pour démontrer l'intérêt d'une gestion collective de l'énergie, plusieurs scénarios ont été établis en 3.5. Dans chacun d'entre eux, une répartition de profils individuels a été introduite et il a été admis que chaque foyer pourrait optimiser ses consommations en fonction de sa sensibilité propre. Ces optimisations ont ensuite été comparées à l'optimisation collective. Les résultats prouvent que suivant les hypothèses retenues dans le dimensionnement de la centrale PV, les prix de l'énergie considérés et les hypothèses retenues pour les impacts environnementaux, l'optimisation collective permet dans chaque scénario d'augmenter la satisfaction individuelle des foyers par rapport à leur sensibilité. Les coûts de l'énergie et leur impact environnemental baissent pendant que le taux d'autoconsommation augmente. Cette augmentation de satisfaction est la prémisse nécessaire à la construction d'un jeu collaboratif. Ce jeu collaboratif va permettre de redistribuer les gains que génère l'optimisation collective aux différents participants de la communauté. La théorie des jeux collaboratifs et différentes méthodes de distribution de gains seront présentées au prochain chapitre .

Enfin, une analyse environnementale a été conduite sur le système de gestion proposé. Les résultats appellent à une vigilance quant à l'impact réellement positif d'un système de management énergétique. Ils prouvent la nécessité de se pencher sur une réelle méthode de quantification des impacts environnementaux des smart grids, et sur de possibles innovations comportementales dans l'utilisation de ceux-ci. Par exemple, dans une communauté d'énergie dont la

production locale est solaire, il est sans doute intéressant de n'utiliser le système de gestion que lorsque l'ensoleillement est suffisant pour couvrir les consommations de la communauté. Ainsi, éteindre le système de gestion, notamment en hiver, pourrait permettre de réduire les impacts environnementaux de la phase d'utilisation des appareils et d'augmenter la durée de vie des équipements. La phase de fabrication de ces appareils est la plus impactante sur l'environnement, et augmenter la durée de vie des appareils permet de diluer ces impacts dans le temps.

Distribution des gains dans la communauté

Sommaire du présent chapitre

Introduction	128
4.1 Construction d'un jeu coopératif	129
4.1.1 Qu'est-ce qu'un jeu coopératif	129
4.1.2 Construction d'un jeu coopératif	130
4.1.3 Les concepts de distributions retenus	131
4.1.4 Application des concepts de distribution	134
4.1.5 Limites des concepts de distribution de gains appliqués à une communauté d'énergie	140
4.2 Adapter les concepts de la théorie des jeux aux gestions énergétiques	141
4.2.1 Modifier les concepts grâce à un système de score . .	141
4.2.2 L'élaboration de la fonction caractéristique	150
4.3 Diminuer le temps de calcul de la résolution du jeu	158
4.3.1 Identification de la problématique dans la littérature	158
4.3.2 Méthodologie	160
4.3.3 Application	163

4.3.4 Conclusion	171
4.4 Conclusion du chapitre	172

Introduction

Le précédent chapitre a permis de discuter des avantages d'une gestion collective de l'énergie. Il a été démontré que, suivant les hypothèses retenues auparavant, peu importe la sensibilité des acteurs, la mise en commun de moyens de production et la coordination d'appareils de flexibilité permet de réduire les coûts et impacts environnementaux associés aux consommations électriques de la communauté. Ces gains sont de plus réalisés par rapport à ce que chaque participant de la communauté pourrait prétendre individuellement. Le système génère donc des gains collectifs. Une fois générés, il est nécessaire de les redistribuer aux différents participants de l'opération. La théorie des jeux, et plus particulièrement la branche collaborative, propose des méthodes de distribution de gains ayant des caractéristiques singulières. Deux méthodes de distribution vont ici être implémentées et discutées. Ces deux méthodes possèdent des propriétés philosophiques différentes dont les caractéristiques seront discutées dans ce chapitre. De même, l'application de concepts mathématiques issus de la théorie des jeux possède des limites quant à leur application dans un cas concret de gestion énergétique. Ces limites seront discutées et des solutions d'adaptation seront proposées.

Enfin, les différentes méthodes de distribution de gains amènent à des questionnements éthiques et organisationnels. Parmi ceux-ci, la question des comportements à récompenser est cruciale. Les objectifs de distribution peuvent également être divergents : une communauté doit-elle choisir par exemple de distribuer des récompenses en suivant des logiques méritocratiques ou en suivant des logiques solidaires ?

4.1 Construction d'un jeu coopératif

4.1.1 Qu'est-ce qu'un jeu coopératif

La théorie des jeux est un concept mathématique qui permet de modéliser des interactions dans un groupe de personnes poursuivant leurs propres stratégies. En théorie des jeux, un jeu coopératif est un jeu dans lequel les joueurs peuvent se concerter et former des coalitions pour coopérer. Contrairement aux jeux non coopératifs où chaque joueur agit indépendamment, les jeux coopératifs permettent aux participants de collaborer pour atteindre un objectif commun. L'objectif de chaque participant est cependant de maximiser son gain personnel. Ces jeux se basent sur l'idée que, dans un contexte économique et sous certaines conditions, la coopération peut permettre de générer plus de gains que la compétition. Ainsi, l'intérêt du jeu collectif est que chaque joueur puisse obtenir des gains en collaborant avec le groupe. Si l'un des joueurs n'est pas récompensé dans le jeu, alors il n'a plus d'intérêt à participer et se tournera vers une stratégie compétitive qui lui permettra de maximiser ses gains individuellement. Cette condition se nomme la rationalité du jeu. Dans le cadre de ces travaux de thèse, la rationalité du jeu dépend du gain total que la communauté peut obtenir en coopérant plutôt qu'en optimisant ses consommations individuellement.

Pour distribuer des gains aux acteurs, plusieurs concepts existent. L'ensemble des distributions rationnelles se trouve dans le cœur du jeu, qui représente l'ensemble des vecteurs de gains x . Certains concepts permettent de retourner un vecteur x unique en récompensant les joueurs selon une philosophie spécifique. Un certain nombre de concepts sont présentés dans [201] et [202]. Deux concepts seront présentés et étudiés dans le contexte de ces travaux de thèse. Ces concepts ont été choisis dans la littérature en fonction de différents critères :

- **L'unicité de la solution** : Les concepts doivent proposer une solution unique afin de fixer le choix de la répartition des gains.
- **La Spécificité mathématique** : La répartition des gains doit poursuivre des objectifs spécifiques tels que l'équité entre les parties prenantes ou la satisfaction des joueurs.

- **L'efficacité en termes de théorie des jeux** : La somme des gains distribués doit être strictement égale au gain total généré par l'autoconsommation collective.

Les deux concepts retenus sont la Valeur de Shapley et le Nucleolus, qui seront présentés en 4.1.3. La Valeur de Shapley est une solution qui répartit les gains en fonction des contributions marginales de chaque joueur, assurant ainsi une répartition équitable selon leur apport. Le Nucleolus, quant à lui, vise à minimiser les mécontentements les plus importants parmi les joueurs, en cherchant une solution qui équilibre au mieux les inégalités perçues.

Enfin, les jeux coopératifs sont des concepts théoriques principalement utilisés en sciences économiques et présentent certaines contraintes dans leur implantation dans un contexte de gestion énergétique. Les travaux de recherche présentés ici utilisent les concepts de la théorie des jeux comme un outil conceptuel et n'ont pas vocation à explorer leurs propriétés mathématiques en profondeur. Des solutions pratiques seront présentées pour adapter cet outil dans le contexte étudié.

4.1.2 Construction d'un jeu coopératif

Un jeu coopératif se construit autour d'un couple $(\mathcal{N}, \mathcal{V})$ désignant le set composé des n joueurs dans le jeu et la fonction caractéristique du jeu. L'ensemble $\mathcal{N}$, dénommé grande coalition, regroupe tous les joueurs, et la fonction caractéristique associée $\mathcal{V}(\mathcal{N})$ représente les gains totaux tels que décrits en 3.5. L'intérêt du jeu, dans notre cas, est qu'à la fin de la distribution des gains, les coûts associés aux consommations d'énergie d'un foyer après redistribution soient inférieurs à ceux qui lui auraient été attribués à la fin de son optimisation individuelle. Cette condition s'appelle la rationalité du jeu.

La fonction caractéristique $\mathcal{V}$ décrit le gain qu'un ensemble de joueurs peut obtenir en formant une coalition. Les coalitions, notées $\mathcal{S}$, sont des sous-ensembles de $\mathcal{N}$ et incluent toutes les combinaisons possibles de joueurs, allant des coalitions composées de joueurs uniques à la grande coalition elle-même.

L'efficacité du jeu signifie que le vecteur de gains divise exactement le gain de la grande coalition : $\sum_{i \in \mathcal{N}} x_i = \mathcal{V}(\mathcal{N})$. $\mathcal{V}(\mathcal{N})$ représente la valeur totale générée

par l'opération d'autoconsommation collective et, par conséquent, l'allocation totale distribuée dans la communauté. Pour répartir ces gains, il est nécessaire de considérer le poids de toutes les coalitions possibles dans le jeu.

La distribution des gains se fait grâce à des concepts éprouvés dans la littérature scientifique.

4.1.3 Les concepts de distributions retenus

La Valeur de Shapley

La valeur de Shapley a été introduite par Lloyd Shapley en 1951 [203]. Elle représente la contribution marginale moyenne d'un joueur dans un jeu. En d'autres termes, plus un joueur contribue aux gains globaux du jeu, plus sa récompense sera élevée. Le concept se base donc sur une philosophie méritocratique. En ce sens, la valeur de Shapley est considérée comme une redistribution individuelle de gains juste et équitable. Les principales propriétés de ce concept sont :

- Efficacité : le vecteur de gain divise exactement le gain de la grande coalition (ici, les gains totaux générés par l'autoconsommation collective).
- Symétrie : si deux joueurs ont la même contribution marginale, ils recevront la même allocation de gains.
- Le joueur nul : si un joueur n'a aucune contribution au jeu, il recevra un gain nul.
- Additivité : lorsque deux coalitions disjointes sont combinées, le gain obtenu est égal à la somme de leurs valeurs séparées.

La valeur de Shapley pour un joueur i , est calculée grâce à l'Equation (4.1) :

$$\varphi_i = \sum_{i \in S, S \subset N} \frac{(n - |S|)! \cdot (|S| - 1)!}{n!} \cdot [\mathcal{V}(S) - \mathcal{V}(S \setminus \{i\})] \quad (4.1)$$

$[\mathcal{V}(S) - \mathcal{V}(S \setminus \{i\})]$ représente la contribution marginale du joueur i dans la coalition S . φ_i est la valeur de Shapley attribuée au joueur i . Le vecteur de gain x sera donc composé de la valeur de Shapley de chaque joueur. Ce concept est le plus couramment utilisé en théorie des jeux collaboratifs dans le contexte de gestion

énergétique. Il est par exemple utilisé dans [115, 204, 205], où une distribution de gains générés par des managements énergétiques sont redistribués aux acteurs de la gestion grâce à la valeur de Shapley. Cette approche permet également de répartir l'énergie selon des clés de répartition innovantes, comme proposé dans [206], ou encore dans [207], où le surplus d'énergie renouvelable généré est redistribué aux foyers à proximité de l'installation.

Le Nucleolus

Le Nucleolus, introduit par Schmeidler [208], est un concept difficile à définir et à analyser, mais il possède des propriétés intéressantes. Il maximise le bien-être global de la coalition la plus défavorisée par le biais d'un processus récursif. Ce processus garantit que la répartition des gains est optimale pour cette coalition, puisque toute autre répartition compromettrait son bien-être maximal. En ce sens, il définit une distribution solidaire et équitable collectivement. En effet, si un joueur rejoint la coalition la plus faible, il recevra une part du gain maximal auquel cette coalition peut prétendre. En outre, comme la valeur de Shapley, le Nucleolus est une solution unique.

Soit x un vecteur de gain. Il est possible de déduire l'excès de x , θ , pour une coalition $\theta(x, S) = \mathcal{V}(S) - \sum_{i \in S} x_i$. L'excès correspond à la différence entre la valeur qu'une coalition de joueurs peut atteindre en formant cette coalition (telle que déterminée par la fonction caractéristique) et le gain total attribué individuellement en intégrant la grande coalition. Cette valeur est calculée pour les $2^{\mathcal{N}}$ coalitions possibles, conduisant à un vecteur d'excès trié par ordre croissant $e(x) = (\theta(x, S_1), \theta(x, S_2), \dots, \theta(x, S_{2^{\mathcal{N}}}))$, où $\theta(x, S_j) \geq \theta(x, S_k)$ pour $1 \leq j \leq k \leq 2^{\mathcal{N}}$. Pour trouver le Nucleolus, il faut définir un ordre lexicographique du vecteur d'excès généré par tous les vecteurs de gain possibles. Mathématiquement, on peut l'écrire comme suit :

$e(x)$ est lexicographiquement ordonné sur $e(y) \Leftrightarrow$ il existe i tel que :

$$1 \leq i \leq 2^{\mathcal{N}} \quad \text{tel que} \quad \theta(x, S_j) = \theta(y, S_j) \quad \forall 1 \leq j \leq i \quad \text{et} \quad \theta(x, S_i) < \theta(y, S_i)$$

Cet ordre est semblable à l'ordre alphabétique utilisé pour classer les mots dans un dictionnaire. Le Nucleolus d'une fonction caractéristique $\mathcal{V}$ est défini comme l'imputation lexicographiquement minimale, déterminée par cet ordre.

En résumé, le Nucleolus est calculé en générant un tableau dont chaque ligne fait référence aux vecteurs $e(x)$. $e(x)$ est l'équivalent d'un tri horizontal basé sur l'excès de x , et l'ordre lexicographique est l'équivalent d'un tri vertical de l'excès en fonction de tous les vecteurs de gain possibles.

La Figure 4.1 résume la façon de calculer le Nucleolus. Le principal inconvénient de cette solution est la complexité de son calcul. En effet, pour le trouver, il est nécessaire de calculer tous les vecteurs de gain possibles, x , tels que $\sum_{i \in \mathcal{N}} x_i = \mathcal{V}(\mathcal{N})$. Un exemple numérique du calcul du Nucleolus est donné dans [202]. Cette exigence de calcul est l'une des raisons pour laquelle le Nucleolus est moins utilisé que la valeur de Shapley dans le contexte de gestion de l'énergie. Il est souvent utilisé en comparaison d'une distribution par valeur de Shapley comme dans [209]. Certaines exceptions existent tout de même, comme dans [210], où un modèle de distribution de gains au sein d'une communauté d'énergie basée sur le Nucleolus est proposé. Afin d'alléger les calculs pour trouver le Nucleolus, le programme linéaire proposé dans [211] est utilisé dans le cadre de nos travaux.

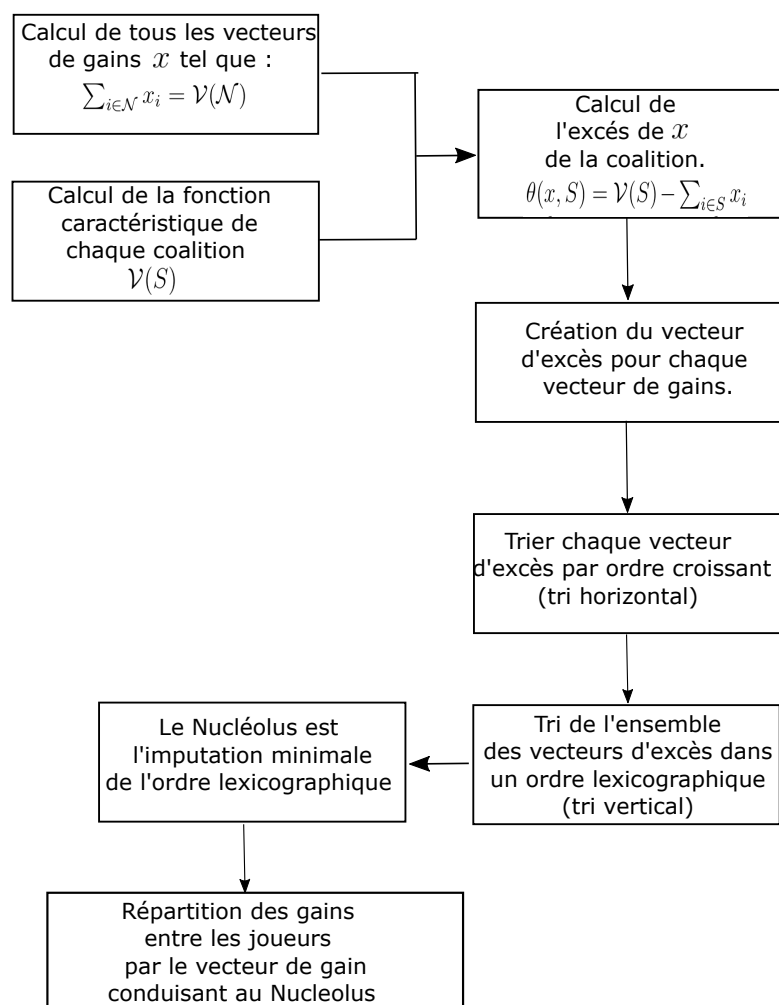


FIGURE 4.1 – Méthode pour générer le Nucleolus

4.1.4 Application des concepts de distribution

Pour illustrer les caractéristiques présentées auparavant, un cas d'application est proposé ici. La théorie des jeux étant un outil développé pour les sciences économiques, le propos sera illustré par une distribution des gains économiques sur ce cas d'application. Il sera donc considéré ici que la communauté est uniquement composée de profils sensibles au prix. D'un point de vue applicatif, ce choix pourrait se justifier par une sélection en amont des participants à la communauté sur leur volonté à réduire leur facture énergétique. L'ensemble des gains que permet la gestion collective est présenté dans le scénario 2 de la

section 3.5.3. Pour rappel, le gain financier que permet l'optimisation collective est de 5%. L'exemple développé ici se concentre sur la distribution de ces gains à l'ensemble de la communauté. La Valeur de Shapley (SV) et le Nucleolus (Ncl) sont donc appliqués.

La fonction caractéristique dédiée à cet exemple est donc calculée pour l'assemble des coalitions possibles dans la grande coalition (Equation 4.2) :

$$\mathcal{V}(\mathcal{S}) = \sum_{i \in \mathcal{S}} C_{optind}^i - C_{optcol}(\mathcal{S}) \quad (4.2)$$

$\mathcal{V}(\mathcal{S})$ est donc calculée pour l'ensemble des coalitions possibles dans la grande coalition.

C_{optind}^i représente la facture d'électricité du foyer i après son optimisation individuelle et $C_{optcol}(\mathcal{S})$ la facture d'électricité associée aux consommations de la coalition $\mathcal{S}$.

Le tableau 4.3 synthétise la part des gains attribuée à chaque foyer en fonction du concept utilisé, c'est-à-dire la part des 5% des gains collectifs qu'ils vont percevoir. Les données de ce tableau sont représentées sur les Figures 4.3 (pour la valeur de Shapley) et 4.4 (pour le Nucleolus). Pour interpréter les résultats, il est nécessaire de préciser deux paramètres supplémentaires : l'énergie flexible disponible pour chaque foyer ($E_{flex tot}^i$) ainsi que les périodes de présence qui permettent la charge des véhicules électriques (VE). Ces données sont résumées dans les tableaux 4.1 et 4.2.

Étant donné que chaque foyer reçoit la même quantité d'énergie solaire, le principal facteur de gain est la flexibilité que fournit chaque foyer. En d'autres termes, c'est le décalage des appareils flexibles pour augmenter le taux d'auto-consommation qui permet de réduire la facture énergétique. Cela permet de consommer de l'énergie à bas coût et d'éviter d'injecter de l'énergie sur le réseau électrique, ce qui représente une perte.

Un autre paramètre important est la consommation de base prévue par le foyer. En effet, le système n'a pas vocation à diminuer les consommations énergétiques d'un foyer, mais à modifier ses habitudes d'usage. Ainsi, dans le cas d'une distribution de gains financiers, la facture énergétique initiale du foyer a un impact sur la distribution. Plus un foyer a une facture élevée, plus son impact

sur la facture de la communauté est négatif.

	H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
$E_{flex\text{tot}}^i$ [kWh]	12.9	19.5	6.2	5.9	11.4	5.9	7.9	5	5
Charge VE [kW]	7	3.7	-	-	3.7	-	-	-	-

TABLEAU 4.1 – Flexibilité disponible des foyers

	H0	H1	H4
Présence	0h-9h/17h-0h	0h-13h/14h-0h	0h-11h/16h-0h

TABLEAU 4.2 – Heures de présence dans les foyers possédant un VE

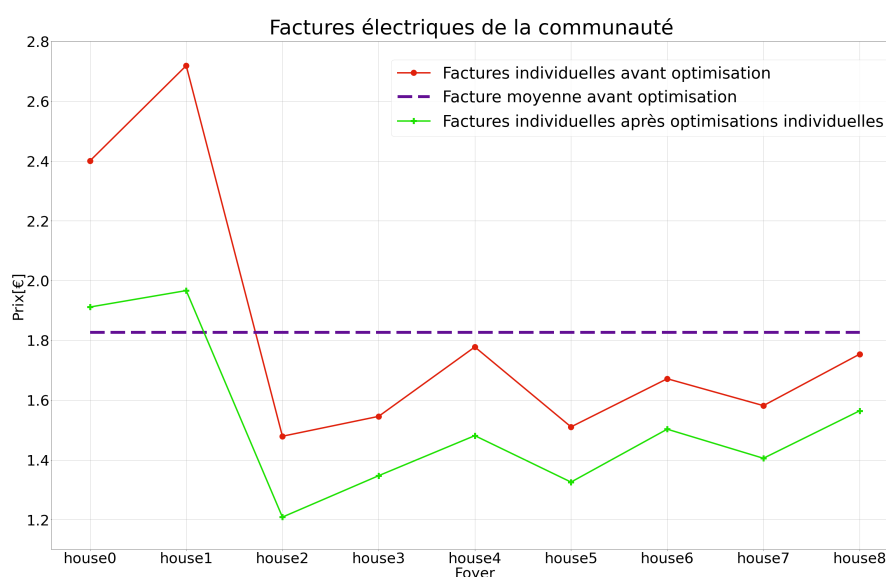


FIGURE 4.2 – Factures d'électricité des foyers avant et après optimisation

	H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
SV	3.9%	4.4%	14.7%	11.9%	16.4%	14.1%	9.4%	13.5%	11.7%
Ncl	13.1%	16.1%	6.7%	9.6%	10.4%	8.5%	11.5%	11.8%	12.3%

TABLEAU 4.3 – Part des gains attribués à chaque foyer

Comme présenté auparavant, la SV permet une distribution méritocratique de gains. Ici, la facture du foyer H0 avant toute optimisation est l'une des plus élevées de la communauté (Figure 4.2). Le foyer possède un fort potentiel de flexibilité en terme d'énergie, mais le plus gros contributeur est le Véhicule Électrique (VE) qui aura peu d'impact sur le taux d'autoconsommation de la communauté après optimisation étant donné les heures de présence dans le foyer. C'est pour cette raison que le foyer H0 est le moins bien récompensé par SV. De même, le foyer H1 est le plus impactant sur la facture globale de la communauté, car ses consommations d'énergies sont plus élevées. Il est le plus gros contributeur en terme de flexibilité, mais est pénalisé par ses consommations électriques importantes. Le foyer H4 est un contributeur moyen en terme de facture énergétique, mais possède un fort potentiel de flexibilité, ce qui lui permet d'être le foyer le plus récompensé. Enfin, le foyer H2 est le plus petit contributeur sur la facture globale de la communauté, ce qui lui permet d'obtenir la plus grosse part de gains par SV.

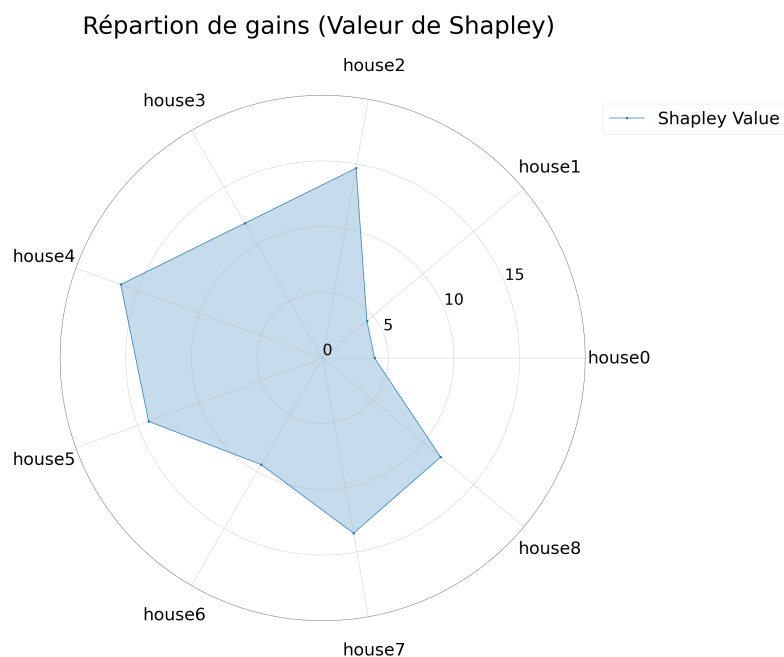


FIGURE 4.3 – Répartition des gains dans la communauté par valeur de Shapley

Étant donné que le Nucleolus minimise l'insatisfaction globale, dans notre

cas des ménages, les plus gros consommateurs bénéficieront de réductions de factures plus importantes grâce à cette solution par rapport à la valeur de Shapley. Le concept permet de réduire les valeurs extrêmes dans la répartition des coûts entre les parties prenantes. C'est pourquoi elle peut être interprétée comme une répartition collectivement équitable. Le principal inconvénient de cette solution est qu'elle ne récompense pas l'effort individuel. Ainsi, ceux qui contribuent le plus à la communauté (par des consommations moins élevées ou grâce à leur flexibilité) pourraient percevoir moins de gains que ceux qui contribuent le moins. La répartition des gains est ainsi plus homogène. Ici, une partie des gains plus importants des foyers H4 et H5 grâce à la valeur de Shapley se voit réduire pour augmenter la part de gains des foyers H0 et H1. Le Nucleolus est donc une répartition intéressante lorsque une philosophie de solidarité est recherchée, car les plus actifs permettent aux plus vulnérables de réduire leurs factures d'électricité. En d'autres termes, les foyers possédants plus de flexibilités et de plus faibles consommations permettront aux autres foyers de réduire leur facture d'énergie.

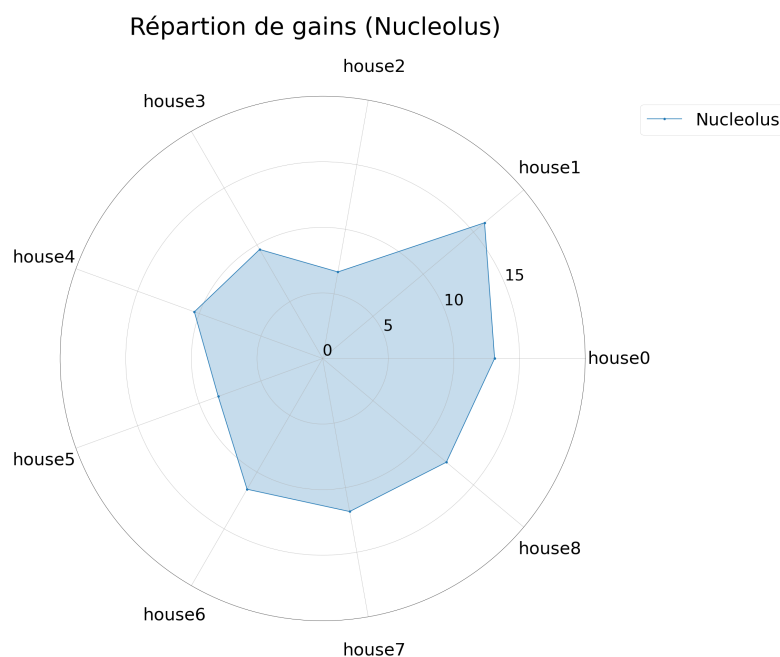


FIGURE 4.4 – Répartition des gains dans la communauté par Nucleolus

Pour aller plus loin, il est possible d'observer la répartition des coûts individuels autour de la moyenne après la distribution de la valeur de Shapley et du Nucleolus. La répartition des coûts avant et après l'optimisation individuelle est présentée dans la Figure 4.2. La même répartition après la distribution des gains est présentée Figure 4.5. Il est possible d'observer que l'ensemble des coûts par distribution avec Nucleolus a une tendance à se rapprocher de la moyenne des coûts, alors que la distribution par SV a tendance à conserver la dispersion initiale. Ainsi, tout en ayant toujours des gains, les foyers les plus performants contribuent bien à la réduction de la facture d'électricité de leurs voisins, signe de la philosophie solidaire du concept. Ces tendances sont cependant plus compliquées à décrire puisque la distribution dépend de la communauté étudiée. La même étude sur une simulation de consommations et une taille de communauté différentes a été présentée dans l'article [212] fournissant des résultats plus significatifs sur cet aspect. Il serait donc intéressant d'effectuer une étude sur un échantillon plus grand pour vérifier la validité statistique de ces observations. Le principal frein à cette étude est la limite liée au temps de calcul de ces concepts, qui sera discutée dans le paragraphe suivant.

Enfin, la dernière observation est que, selon les hypothèses émises, tous les joueurs ont intérêt à participer à la gestion collective de l'énergie. En effet, chaque joueur obtient une facture d'énergie plus faible en participant au jeu collectif que s'il avait optimisé ses consommations individuellement en fonction du prix. Le jeu établi est donc construit correctement du point de vue de la théorie des jeux.

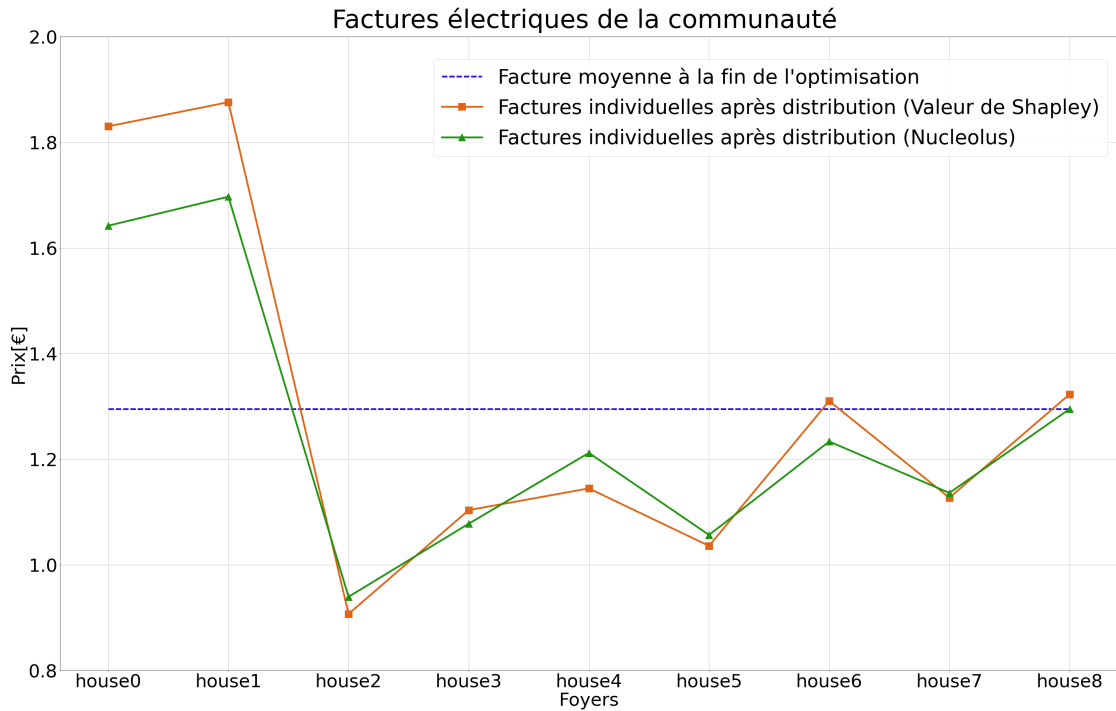


FIGURE 4.5 – Factures d’électricité des foyers après distribution par SV et Nucleolus

4.1.5 Limites des concepts de distribution de gains appliqués à une communauté d’énergie

Dans ces travaux, deux grandes limites ont été observées quant à l’utilisation de la théorie des jeux collaboratifs dans le cadre d’une gestion énergétique.

Tout d’abord, la répartition des gains se fait en grande partie en fonction de la part des consommations d’un foyer sur la consommation globale de la communauté. Le système repose sur un principe de flexibilité, et bien souvent, les foyers les plus flexibles sont en même temps les foyers les plus consommateurs en énergie. Ainsi, ceux qui participent le plus en décalant leur consommation ne sont pas forcément les plus récompensés si leur consommation ne représente qu’une faible part de la consommation globale de la communauté. Même si l’ensemble des participants est gagnant à la fin, cela pourrait être perçu comme injuste par les membres de la communauté. La section 4.2 sera dédiée à une

proposition d'adaptation de ces concepts dans un contexte de management énergétique basé sur un système de flexibilité.

La deuxième limite, plus importante encore, est le temps de calcul nécessaire pour résoudre le jeu. En effet, pour calculer le vecteur de gains de la communauté, il est nécessaire de calculer la contribution de toutes les coalitions possibles grâce à la fonction caractéristique $\mathcal{V}(S)$. Ainsi, un jeu composé de n joueurs dans $\mathcal{N}$ conduit à 2^n résolutions de la fonction caractéristique du jeu. Une méthode permettant de limiter le temps de calcul en cassant le caractère exponentiel du calcul sera présentée au paragraphe 4.3.

Bien sûr, il est possible de répondre à ces limites grâce à d'autres méthodes que celles qui seront proposées, mais celles qui seront présentées semblent intéressantes à exploiter dans des travaux multidisciplinaires tels que celui-ci.

4.2 Adapter les concepts de la théorie des jeux aux gestions énergétiques

4.2.1 Modifier les concepts grâce à un système de score

Méthodologie

Comme discuté précédemment, les deux concepts présentés dans les parties précédentes présentent des propriétés intéressantes pour la distribution des gains dans un jeu coopératif. Cependant, même si le prix dépend directement de la consommation électrique, notamment dans le cadre d'une tarification dynamique de l'énergie, l'effort de flexibilité et d'économie d'énergie n'est pas directement récompensé. En effet, la composition et la taille d'un foyer influent considérablement sur les consommations d'énergie.

Il est normal qu'un foyer composé d'une personne consomme moins d'énergie qu'un foyer composé de quatre occupants. Considérer uniquement les contributions financières initiales est donc discriminatoire pour certains ménages, car ces contributions ne prennent pas en compte le type de logement, sa taille, ou le nombre d'occupants. Comme la seule caractéristique du logement qui peut être isolée des simulations est le nombre d'occupants, une adaptation des valeurs

basées sur les contributions par occupant pour la flexibilité et les efforts en terme de sobriété ou d'efficacité énergétique est ici proposée.

L'énergie flexible disponible par personne et la consommation totale par personne dans un ménage sont donc calculées. Considérons E_{flex} et E_{eff} les vecteurs composés respectivement de l'énergie flexible par personne et de la consommation par personne des n logements. Ces valeurs sont ensuite normalisées par la méthode min-max afin d'obtenir, pour un logement i , les paramètres ε_{flex}^i et ε_{eff}^i , représentant leur performance dans la communauté en matière de flexibilité et d'effort de réduction d'énergie par personne. Leurs calculs sont effectués suivant les Équations 4.3 et 4.4.

$$\varepsilon_{flex}^i = \frac{E_{flex}^i - \min(E_{flex})}{\max(E_{flex}) - \min(E_{flex})} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_{eff}^i = \frac{E_{eff}^i - \min(E_{eff})}{\max(E_{eff}) - \min(E_{eff})} \quad (4.4)$$

Grâce à cette méthode de normalisation, le logement le plus performant se verra attribuer une valeur égale à 1, et le moins performant une valeur égale à 0. Une pondération est ensuite effectuée pour obtenir un score total (Δ_{Score}^i) pour chaque logement. La pondération peut être adaptée aux objectifs d'une communauté donnée, c'est-à-dire que la communauté peut choisir quels comportements parmi les deux possibilités elle souhaite encourager en priorité.

Le score total d'un foyer est calculé selon l'Équation 4.5 :

$$\Delta_{Score}^i = w_{flex} \cdot \varepsilon_{flex}^i + w_{eff} \cdot (1 - \varepsilon_{eff}^i) \quad (4.5)$$

Le score doit ensuite être appliqué à la valeur de Shapley et au Nucleolus. Pour cela, une nouvelle normalisation sur les scores est faite. Soit le vecteur des scores normalisés, ($d = (d^1, \dots, d^n)$). Ce vecteur représente la part des gains/-pertes supplémentaires que le joueur i reçoit grâce à son score. Cette normalisation garantit que la somme des contributions de tous les joueurs est égale à 1, ce qui est nécessaire pour maintenir l'efficacité du jeu (Équation 4.6). Pour cela, la mesure normalisée du score de chaque joueur par rapport au score moyen

$(\overline{\Delta_{Score}})$ est considérée. La normalisation des scores est établie suivant l'Équation 4.7. La nouvelle valeur de Shapley (φ_i^*) est donnée par l'Équation 4.8. Les mêmes équations sont appliquées au Nucleolus.

$$\sum_{i \in \mathcal{N}} \varphi_i^* = \mathcal{V}(\mathcal{N}) \quad (4.6)$$

$$d^i = \frac{\Delta_{Score}^i - \overline{\Delta_{Score}}}{\sum_{i=1}^{\mathcal{N}} (\Delta_{Score}^i)} \quad (4.7)$$

$$\varphi_i^* = \varphi_i \cdot (1 + d^i) \quad (4.8)$$

Cette approche permet de mieux récompenser les foyers qui, malgré une taille plus grande, font des efforts significatifs pour améliorer leur performance énergétique, ou ceux qui participent le plus au programme de flexibilité.

Cas d'étude

Trois scénarios seront étudiés dans ce cas d'étude. Le premier scénario considèrera une récompense basée uniquement sur les potentialités de flexibilité ($w_{flex}=1, w_{eff}=0$). Le deuxième scénario récompensera les efforts de sobriété ou d'efficacité énergétique ($w_{flex}=0, w_{eff}=1$). Enfin, un troisième scénario répartira les récompenses de manière équitable entre la flexibilité et les efforts de sobriété énergétique ($w_{flex}=0.5, w_{eff}=0.5$). Les Figures 4.6(a) et 4.7(a) représentent le poids de chaque foyer dans respectivement les consommations et les flexibilités dans la communauté. Les Figures 4.6(b) et 4.7(b) représentent les mêmes valeurs par occupant du foyer. Ces données permettront d'expliquer les résultats de ce paragraphe. Il est, tout de même, intéressant de remarquer dès à présent les cas des foyer H1 et H5. Le premier par sa grande flexibilité (36% de celle de la communauté ramené aux nombre de personnes) et le second par sa faible flexibilité (3.8% de celle de la communauté ramené aux nombre de personnes).

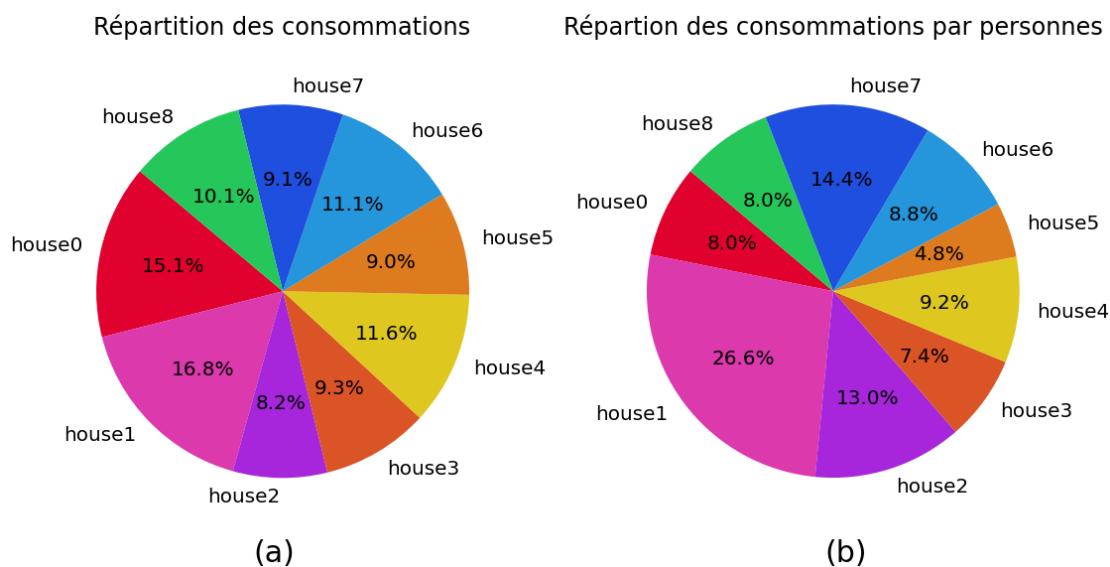


FIGURE 4.6 – Répartition des consommations (a) et des consommations par personnes (b) dans la communauté

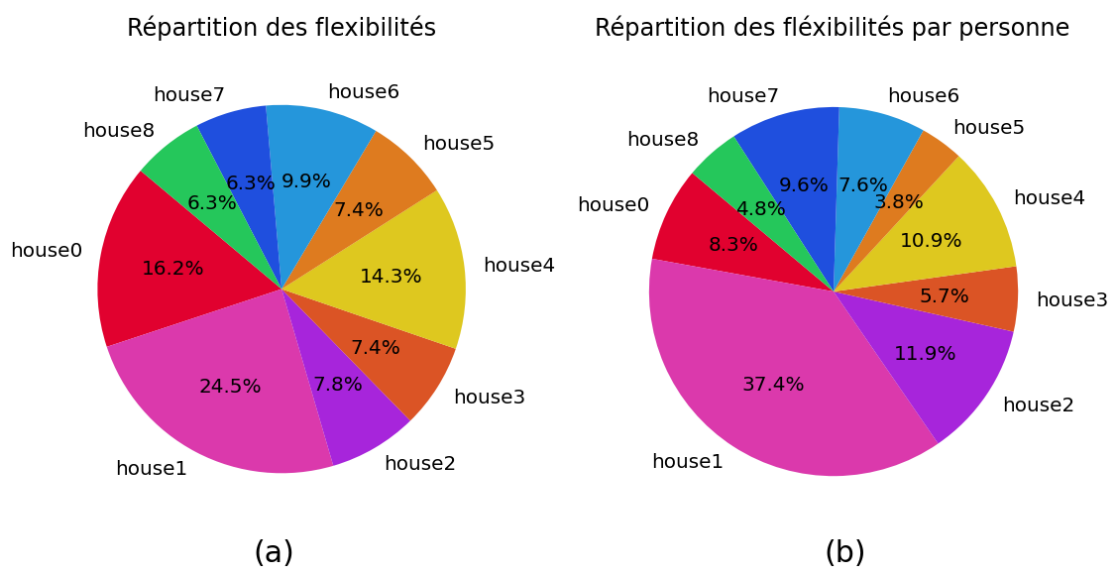


FIGURE 4.7 – Répartition des flexibilités (a) et des flexibilités par personnes (b) dans la communauté

Scénario 1 ($(w_{flex}=1 ; w_{eff}=0)$) :

La Figure 4.8 représente la répartition des gains après modification de la valeur de Shapley 4.8(a) et la modification du Nucleolus 4.8(b) basées sur les poten-

tialités de flexibilité. Les répartitions SV et Nucleolus originales sont également représentées pour une meilleure comparaison avec l'adaptation proposée. Les foyers H0, H2 et H7 sont ceux qui possèdent un potentiel de flexibilité par personne le plus élevé. Le foyer H1 particulièrement va se voir attribuer environ 50% des gains de la communauté, car il contribue fortement aux flexibilités. Les variations entre les valeurs de Shapley et le Nucleolus modifiés sont beaucoup moins significatives que pour les valeurs originales. Cela signifie que lorsque la récompense se fait sur un paramètre dont la répartition au sein de la communauté est extrême, les philosophies des différents concepts ne sont plus respectées. En outre, le foyer H5 (qui est le moins contributeur) se voit même attribuer un gain négatif avec le Nucleolus modifié. Dans ce cas précis, ce foyer n'a plus aucun intérêt à participer à l'opération collective et pourrait être susceptible de sortir du jeu. La stabilité du jeu serait donc remise en question et le système de gestion pourrait ainsi ne plus être considéré par la communauté.

Quel que soit le concept, le système de récompense se base alors sur un système méritocratique extrême dans lequel peu de joueurs vont se voir attribuer beaucoup de gains. Les potentiels de flexibilités étant de plus souvent associés à des ménages possédant plus de moyens financiers, le risque pourrait être d'augmenter les inégalités de la communauté. Cependant, pour un objectif de réduction des contraintes sur le réseau de distribution, ce système permettrait d'encourager fortement les comportements liés aux flexibilité. Dans tous les cas, il est nécessaire de bien considérer les conséquences d'un tel système de récompense avant de le mettre en œuvre.

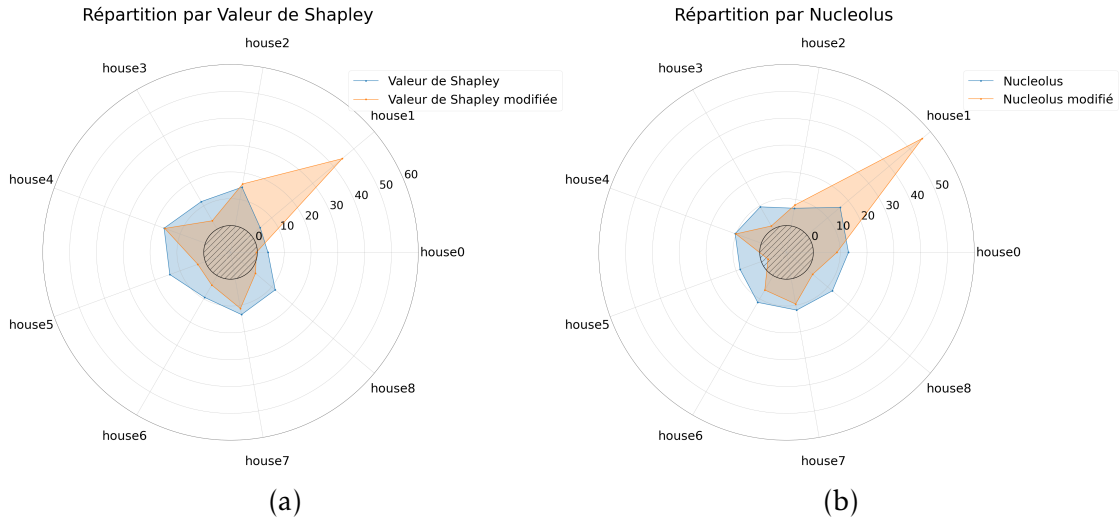


FIGURE 4.8 – Répartition de gains par Valeurs de Shapley modifiée (a) et Nucleolus modifié (b) par potentiel de flexibilité par personne

Scénario 2(($w_{flex}=0$; $w_{eff}=1$)) :

La Figure 4.9 représente la répartition des gains après modification de la Valeur de Shapley 4.9(a) et la modification du Nucleolus 4.9(b) basée sur les efforts de sobriété ou d’efficacité énergétique. Dans ce scénario, plus l’énergie consommée par personne d’un foyer est élevée, plus ses gains vont se réduire. C’est le cas ici des foyers H0 et H1 qui voient leurs gains baisser significativement. La valeur de Shapley du foyer H1 devient même négative, provoquant la même instabilité du jeu expliquée pour le scénario 1. La configuration de la communauté étudiée permet cependant de réduire les gains des foyers les plus consommateurs d’énergie pour les redistribuer aux autres foyers. Dans le cas du Nucleolus, la plupart des foyers vont recevoir une part équivalente de gains.

Cet exemple pourrait être intéressant dans le cadre de la lutte contre la précarité énergétique. La précarité énergétique est souvent associée à des consommations énergétiques réduites par manque de moyens. En d’autres termes, les foyers précaires énergétiquement ont tendance à avoir des consommations en énergie faibles, car ils possèdent des moyens financiers restreints. De plus, ce sont souvent des foyers qui ne seront pas équipés en matériel d’automatisation des équipements.

Ici, le foyer H5 est celui dont les consommations d’énergie par personne sont

les plus faibles. C'est également ce foyer qui capte une partie des gains que le foyer H1 se verra retirer. La répartition des gains est donc basée sur un système de solidarité entre membres de la communauté, alors que le scénario 1 était basé sur un système méritocratique.

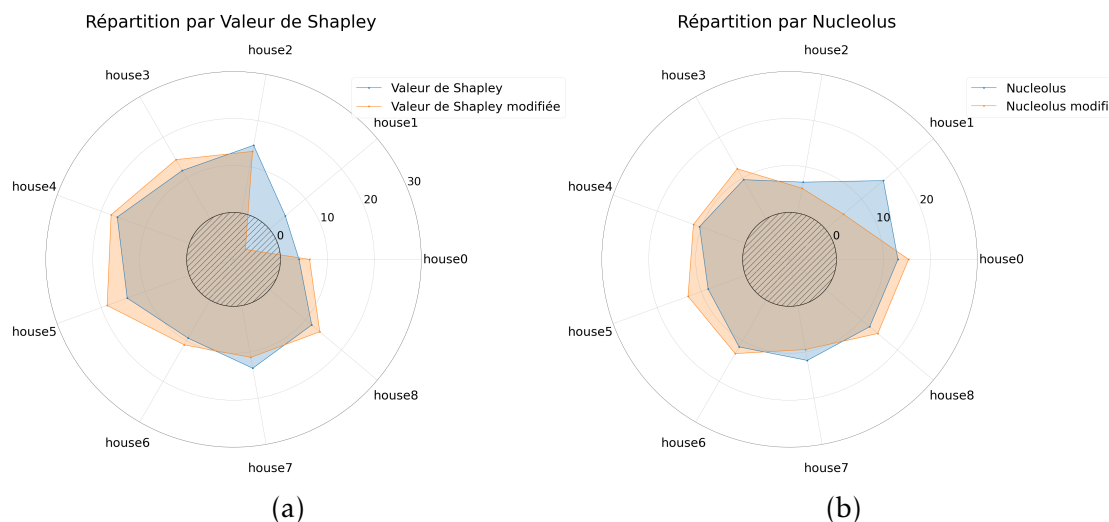


FIGURE 4.9 – Répartition de gains par Valeurs de Shapley modifiée (a) et Nucleolus modifié (b) par consommations par personne

Scénario 3 ($(w_{flex}=0.5; w_{eff}=0.5)$) :

La Figure 4.10 représente la répartition des gains après modification de la Valeur de Shapley 4.10(a) et la modification du Nucleolus 4.10(b), qui récompense équitablement les efforts de flexibilité et de consommation d'énergie. Ce scénario permet de valider l'hypothèse selon laquelle les paramètres contribuant le plus au système de récompense sont la flexibilité effectuée et les consommations de base des foyers, qui déterminent leurs factures énergétiques. En effet, modifier les concepts de la théorie des jeux en fonction de ces deux paramètres simultanément, résulte dans une répartition de gains similaire à celle avant toute adaptation.

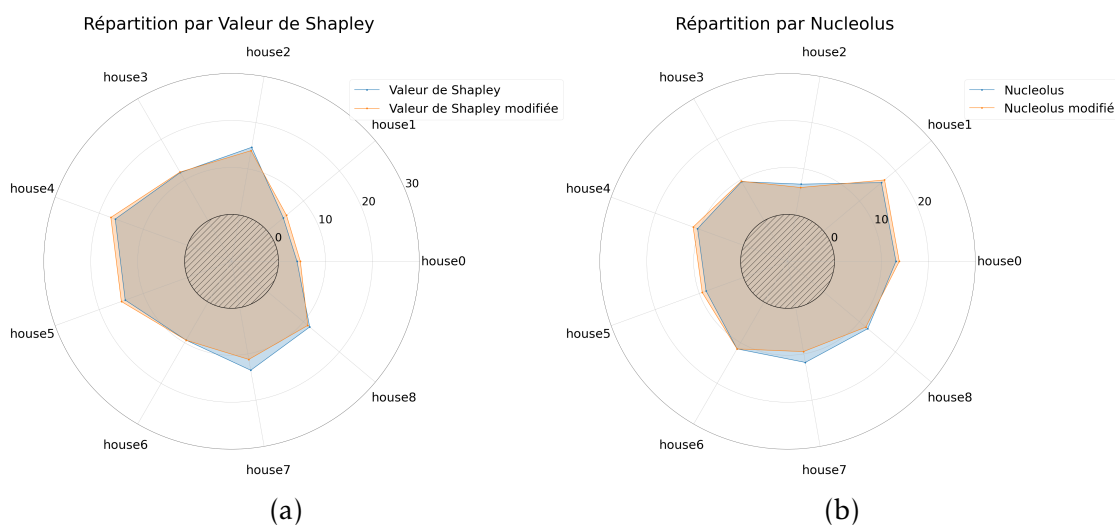


FIGURE 4.10 – Répartition de gains par Valeurs de Shapley modifiée (a) et Nucleolus modifié (b) en considérant effort de flexibilité et de consommation d'énergie

Conclusion et discussions

Les tableaux 4.4 et 4.5 synthétisent les différentes répartitions de gains en fonction des trois scénarios étudiés respectivement par SV et par Nucleolus. Cette méthodologie a pour but de récompenser des comportements liés à la gestion de l'énergie. La première observation est que, suivant la configuration de la communauté et les disparités entre les participants sur le paramètre de récompense, le principe même du jeu collaboratif n'est pas respecté comme dans les cas des deux premiers scénarios. Ainsi, il est possible de se retrouver dans la situation où un foyer aura plus d'avantages à optimiser ses consommations seul plutôt que de participer à l'opération collective. De ce fait, il est nécessaire de bien identifier les disparités en termes de consommations et de flexibilité au sein de la communauté ainsi que les objectifs de celle-ci afin de garantir la stabilité du jeu tout en poursuivant les objectifs collectifs.

Le scénario 3 permet une lecture intéressante sur l'interprétation des résultats. En effet, une pondération équitable entre les deux paramètres de récompense permet de retrouver les résultats des concepts originaux. Ces résultats prouvent que ces deux paramètres sont les plus importants dans les calculs de distribution de gains. En les couplant aux résultats des deux autres scénarios, il est également possible de conclure que le potentiel de flexibilité permet d'établir un concept

de distribution de gains méritocratiques. Le foyer le plus flexible capitalise beaucoup de gains. En revanche, les consommations d'énergie permettent une distribution de gains qui respecte un principe de solidarité.

Reprenons les présentations des concepts de la valeur de Shapley et du Nucleolus en section 4.1.3. La valeur de Shapley est perçue comme juste car elle récompense les foyers qui contribuent le plus à la communauté. Bien que les consommations d'énergie initiales soient un facteur important dans l'application de ce concept, les résultats du scénario 1 montrent que la contribution peut être représentée par les efforts de flexibilité. Ainsi, la valeur de Shapley permettrait une distribution en fonction de la contribution de chaque foyer en termes de flexibilité. Les consommations d'énergie sont alors le facteur limitant de la contribution. Plus un foyer est consommateur, plus il sera perçu dans le jeu comme un contributeur négatif à la communauté.

Ainsi, le principal facteur intervenant dans le calcul du Nucleolus serait les consommations énergétiques d'un foyer. Plus un foyer consomme d'énergie, plus il aura de chances de se retrouver dans la coalition la plus défavorisée du jeu, et donc plus il recevra de gains. L'application d'une correction du Nucleolus comme établie en scénario 2 permet une récompense par Nucleolus qui suit encore plus une logique de solidarité dans la communauté.

Dans tous les cas, le choix de la pondération permet d'adapter la théorie des jeux dans un contexte de management de l'énergie. Celle-ci permet d'accentuer les philosophies des deux concepts de distribution.

	Scénario 1, ($w_{flex}=1, w_{eff}=0$)								
	H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
Répartition	-0.4%	44.3%	15.9%	3.6%	16.1%	3%	4%	11.2%	2.15%
	Scénario 2, ($w_{flex}=0, w_{eff}=1$)								
	H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
Répartition	6.2%	-6.7%	13.3%	14.5%	17.8%	18.7%	11%	11.2%	14%
	Scénario 3, ($w_{flex}=0.5, w_{eff}=0.5$)								
	H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
Répartition	4.7%	5.3%	13.9%	12%	17.4%	15%	9.4%	11.2%	11.2%

TABLEAU 4.4 – Résumés des distributions par valeur de Shapley modifiée

	Scénario 1, ($w_{flex}=1, w_{eff}=0$)								
	H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
Répartition	8.8%	56%	7.9%	1.4%	10.1%	-2.6%	6.2%	9.5%	2.7%
	Scénario 2, ($w_{flex}=0, w_{eff}=1$)								
	H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
Répartition	15.3%	5%	5.4%	12.3%	11.8%	13%	13.2%	9.5%	14.5%
	Scénario 3, ($w_{flex}=0.5, w_{eff}=0.5$)								
	H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
Répartition	13.8%	17%	6%	9.7%	11.4%	9.3%	11.5%	9.5%	11.8%

TABLEAU 4.5 – Résumés des distributions par Nucleolus modifié

4.2.2 L'élaboration de la fonction caractéristique pour respecter les sensibilités des participants

Méthodologie

L'ensemble des résultats présentés jusqu'ici en terme de distribution de gains se basaient sur une répartition de profils uniques. Les gains distribués étaient uniquement financiers et concernaient des profils sensibles au prix. La question qui s'est alors ensuite posée était : comment récompenser chaque

participant équitablement en prenant en compte ses motivations pour intégrer une communauté d'énergie ?

La réponse proposée dans ces travaux de recherche est de transformer la fonction caractéristique du jeu. L'objectif est de diriger la distribution de gains par la valeur de Shapley et par le Nucleolus en considérant les apports de la solution collective en termes d'économies sur la facture, de baisse d'impacts environnementaux et de hausse du taux d'autoconsommation collectif. Deux paramètres sont donc distribués dans la communauté à la fin du processus : les gains sur la facture énergétique et les gains sur l'impact environnemental. Le premier est une distribution financière directe, tandis que l'autre doit être perçu comme une récompense morale. Pour une distribution équitable des gains par SV ou Nucleolus, il est nécessaire d'estimer la fonction caractéristique $\mathcal{V}(\mathcal{S})$ qui représente le gain qu'une coalition $\mathcal{S}$ peut prétendre par rapport à la somme de ceux obtenus individuellement. D'un point de vue financier, cette fonction se calcule suivant l'Equation (4.2) telle que rappelée ci-dessous.

$$\mathcal{V}(\mathcal{S}) = \sum_{i \in \mathcal{S}} C_{optind}^i - C_{optcol}(\mathcal{S}) \quad (4.2)$$

Pour récompenser 3 sensibilités différentes, une des solutions est donc d'adapter cette fonction.

Les profils sensibles à l'autonomie sont pris en compte en calculant la contribution marginale d'une coalition $\mathcal{S}$, $\mathcal{M}(\mathcal{S})$, sur le taux d'autoconsommation global après les optimisations individuelles. Lorsqu'une coalition est composée de joueurs sensibles à l'autonomie, sa contribution marginale augmente. Comme ces joueurs optimisent leur consommation individuellement en fonction de leur taux d'autoconsommation, ils contribuent plus que les autres à augmenter le taux d'autoconsommation de l'ensemble de la communauté. Pour chaque coalition, le taux d'autoconsommation est calculé en fonction de la somme des consommations et des productions individuelles des foyers qui composent la coalition $\mathcal{S}$. L'équation 4.9 permet de déterminer la contribution marginale d'une coalition $\mathcal{S}$ dans le taux d'autoconsommation de la communauté. Cette équation est inspirée de l'équation de la valeur de Shapley.

$$\mathcal{M}(S) = \mathcal{A}(\mathcal{N}) - \mathcal{A}(\mathcal{N} \setminus \{S\}) \quad (4.9)$$

$\mathcal{A}(\mathcal{N})$ représente le taux d'autoconsommation total de la communauté après toutes les optimisations individuelles. $\mathcal{A}(\mathcal{N} \setminus \{S\})$ représente l'autoconsommation si toutes les consommations et productions des acteurs composant S ne sont pas attribuées à la communauté. $\mathcal{M}(S)$ représente donc la contribution d'une coalition au taux d'autoconsommation de l'ensemble de la communauté après les optimisations individuelles. $\mathcal{M}(S)$ peut donc être perçu comme la composante "autonome" de la fonction caractéristique du jeu pour la coalition S ($\mathcal{V}_{auto}(S)$). Ses valeurs numériques sont comprises entre $[-1, 1]$.

Pour considérer les sensibilités au prix et à l'impact environnemental dans la communauté, les composantes $\mathcal{V}_{cost}(S)$ et $\mathcal{V}_{env}(S)$ sont calculées respectivement par les équations 4.10 et 4.11.

$$V_{cost}(S) = \sum_{i \in S} C_{optind}^i - C_{optcol}(S) \quad (4.10)$$

$$V_{env}(S) = \sum_{i \in S} \tau_{optind} - \tau_{optcol} \quad (4.11)$$

L'objectif final est d'élaborer $\mathcal{V}(S)$ dont les valeurs numériques sont comprises entre $[0, 1]$ et où $\mathcal{V}(\mathcal{N})=1$. Cela signifie que les gains distribués représentent un pourcentage du gain total généré par l'autoconsommation collective. Pour cela et pour une comparaison lors du calcul de valeurs ayant différents ordres de grandeurs, $V_{cost}(S)$ et $V_{env}(S)$ sont normalisés respectivement par $\mathcal{G}_{cost}$ et $\mathcal{G}_{env}$, représentant les gains financiers et environnementaux totaux générés à la fin des deux optimisations. Ainsi, le calcul de $\mathcal{V}(S)$ se fait grâce à l'équation 4.12.

$$\mathcal{V}(S) = \frac{V_{cost}(S)}{\mathcal{G}_{cost}} \times r_{cost} + \frac{V_{cost}(S)}{\mathcal{G}_{env}} \times r_{env} + V_{env}(S) \times r_{auto} \quad (4.12)$$

Cette équation est composée des trois parties distinctes pondérées par $r = (r_{cost}, r_{env}, r_{auto})$, tel que $r_{cost} + r_{env} + r_{auto} = 1$, ce qui permet de personnaliser la répartition des gains en fonction de la composition de la communauté. Une fois que la valeur de la fonction caractéristique est établie pour toutes les coalitions, il est possible d'appliquer la SV et le Nucleolus tels que définis en 4.1.3.

La définition de la fonction caractéristique est une étape importante dans la philosophie multidisciplinaire de ces travaux de recherche. En effet, le calcul présenté ci-dessus permet de considérer les efforts de chaque foyer en fonction de leur idéal-type défini en 3.1.2. Cette fonction permet de définir la contribution d'un foyer dans l'ensemble des coalitions dans lesquelles il peut se trouver en considérant les trois paramètres observés par chaque profil. Par exemple, la valeur de Shapley permettra de retourner la moyenne de la contribution marginale d'un foyer dans la communauté suivant la fonction $\mathcal{V}(\mathcal{S})$. Si un foyer décide de prioriser les gains environnementaux sur les gains financiers, il pourrait individuellement programmer des appareils à des heures où l'énergie est plus chère. En appliquant la fonction caractéristique telle que définie par l'Equation 4.12, il est possible d'estimer la proportion de l'effort moyen d'un foyer sur les trois paramètres et de redistribuer des gains en fonction de cette proportion. La distribution se fait sur les gains financiers et les gains sur l'impact environnemental tels que définis par les équations 4.13 et 4.14 pour la valeur de Shapley. Le même calcul est effectué pour le Nucleolus.

$$\varphi_{cost}^i = \varphi_i \times \mathcal{G}_{cost} \quad (4.13)$$

$$\varphi_{env}^i = \varphi_i \times \mathcal{G}_{env} \quad (4.14)$$

Application

La répartition des profils dans la communauté est celle présentée dans le scénario 4 de la section 3.5.3. Le tableau 3.19 permet de rappeler cette répartition. Pour rappel, avec cette répartition de profil, l'optimisation collective permet d'augmenter le taux d'autoconsommation de 13% et de réduire les coûts et les impacts environnementaux respectivement de 7.2% et de 9.3% par rapport à l'ensemble des optimisations individuelles. La distribution va se faire ici en fonction de ces gains et en prenant en compte la répartition de profils en ajustant le paramètre de pondération r telle que $r=(1/3,1/3,1/3)$. Cette distribution sera comparée à une distribution uniquement basée sur l'aspect financier ($r=(1,0,0)$) tel que souvent proposée dans la littérature.

Les Figures 4.11 et 4.12 représentent respectivement la valeur de Shapley et

le Nucleolus pour les deux distributions. Le tableau 4.6 résume les différentes répartitions de ces figures.

Répartition par Valeur de Shapley

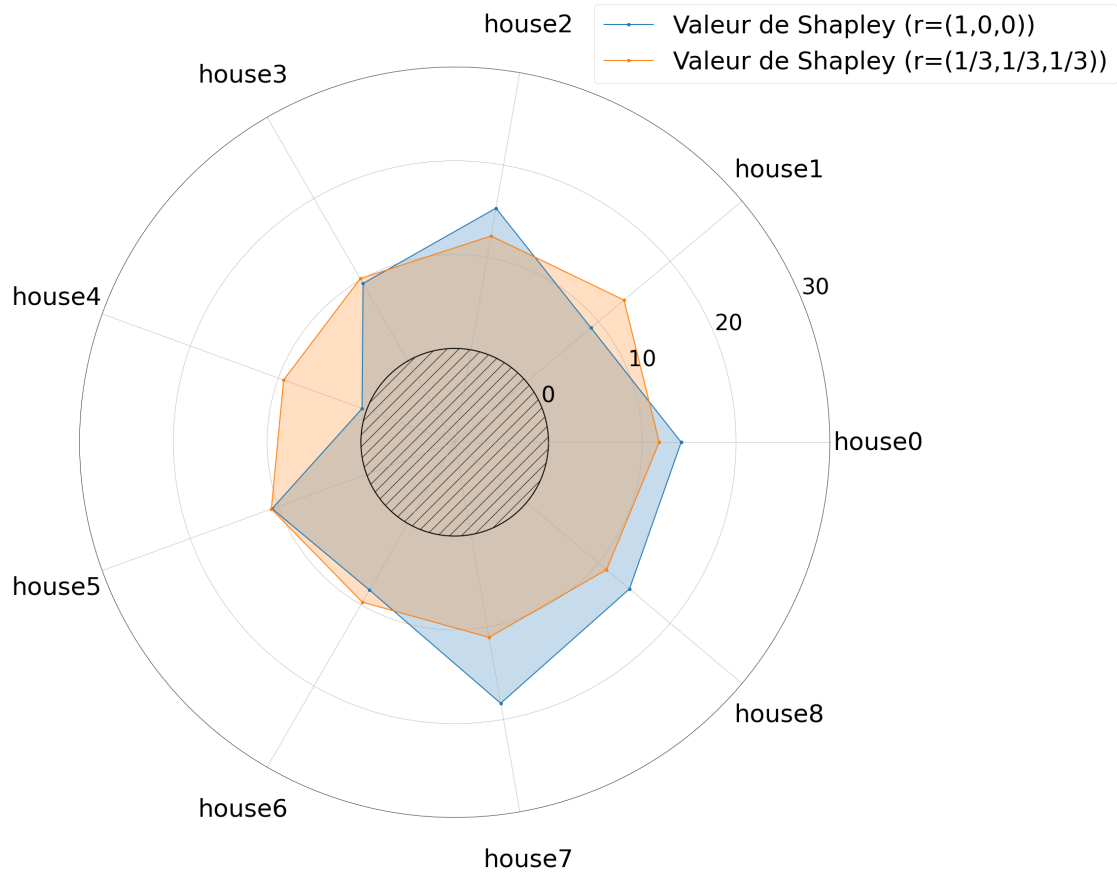


FIGURE 4.11 – Distribution par valeur de Shapley pour $r=(1,0,0)$ et $r=(1/3,1/3,1/3)$

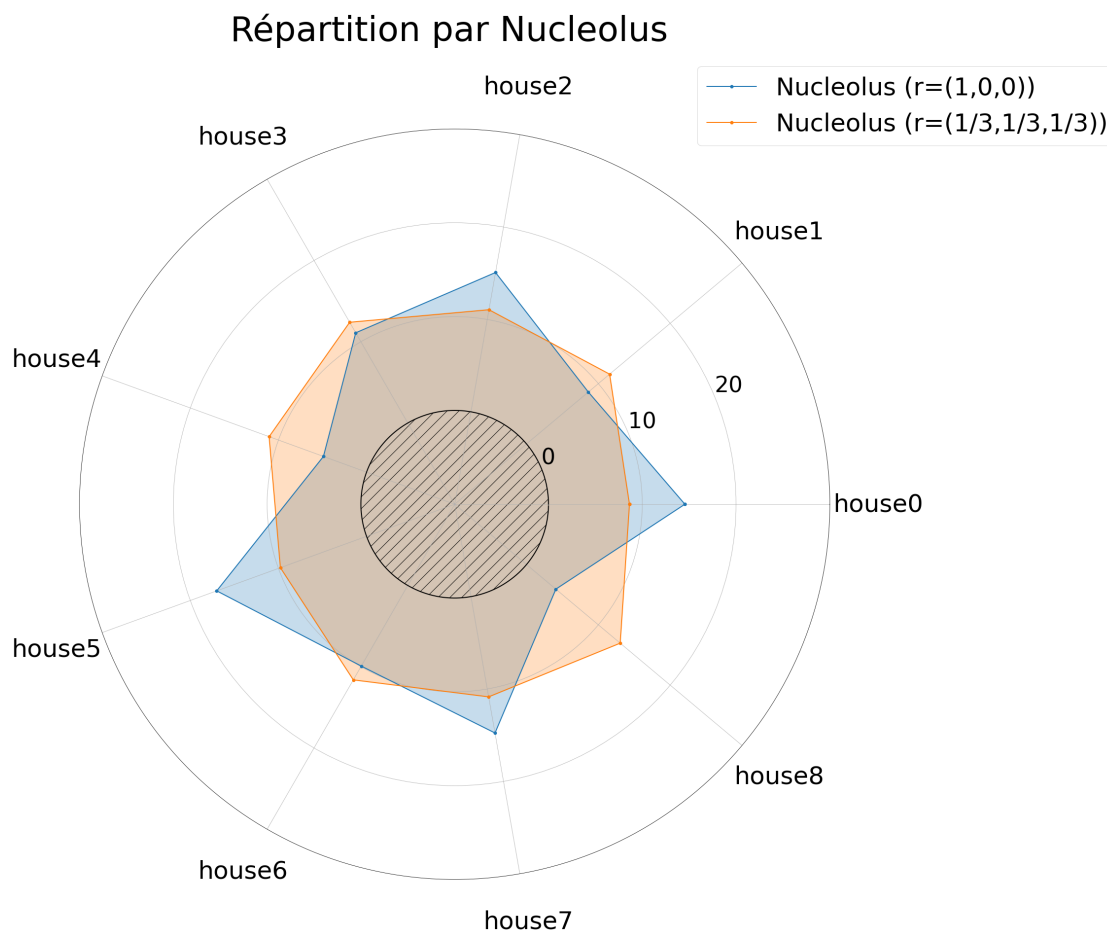


FIGURE 4.12 – Distribution par Nucleolus pour $r=(1,0,0)$ et $r=(1/3,1/3,1/3)$

	H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
Profile	env	env	auto	auto	eco	eco	env	auto	eco
	Valeur de Shapley								
$r=(1,0,0)$	14.1	9	15.3	9.5	0.5	10.7	8.2	18.2	14.3
$r=(1/3,1/3,1/3)$	11.8	13.6	12.3	10.1	9.4	10.8	9.7	11.1	11.1
	Nucleolus								
$r=(1,0,0)$	14.5	8.6	15.1	11.1	4.9	17	9.9	14.8	4.1
$r=(1/3,1/3,1/3)$	8.6	11.6	11	12.4	11.1	9.8	11.6	10.8	13

TABLEAU 4.6 – Part des gains attribués à chaque foyer en fonction de la pondération de $\mathcal{V}(\mathcal{S})$ en considérant une récompense sur le prix ($r=(1,0,0)$) et une récompense prenant en compte les sensibilités ($r=(1/3,1/3,1/3)$)

Ces distributions permettent de comprendre, dans un premier temps, l'importance de considérer la structure sociale de la communauté. En observant les profils sensibles au prix, on s'aperçoit que leurs gains dans un jeu où seul l'aspect financier est récompensé diffèrent des gains obtenus dans le cadre d'une communauté composée uniquement de profils économes (voir 4.1.4). Cela s'explique par le fait que les autres joueurs vont poursuivre d'autres stratégies qui pourraient faire varier les coûts de la communauté après les optimisations individuelles. En comparaison avec l'optimisation collective, les écarts entre les deux types d'optimisation varient et modifient ainsi les résultats des concepts. La contribution de chaque foyer dans la réduction des coûts de la communauté après optimisation collective est donc différente.

En effet, la facture globale de la communauté après optimisation collective ($(C_{optcol}(N))$) reste inchangée puisque l'objectif est le même qu'auparavant. Cependant, la facture globale de la communauté après optimisations individuelles ($(\sum_{i \in N} C_{optind}^i)$) n'est plus la même, car les stratégies des profils autonomes et sensibles à l'environnement diffèrent de celles des profils sensibles au prix. Celle-ci est plus importante dans l'exemple de cette section, car certains foyers choisiront individuellement de payer une énergie plus chère pour augmenter la part d'Énergies Renouvelables (ENR) consommée ou pour réduire les impacts environnementaux. La contribution de chacun dans la réduction de la facture

globale n'est donc plus la même.

Pour permettre une répartition plus juste dans ce cas-là, la solution qui consiste à modifier la fonction caractéristique est intéressante. En effet, les stratégies peuvent être complémentaires sur les trois paramètres étudiés. Par exemple, augmenter le taux d'autoconsommation permet en même temps de diminuer la facture de la communauté et son impact environnemental. Cette complémentarité sur les trois paramètres s'observe en ajustant la pondération de la fonction caractéristique en fonction de la composition de la communauté en termes de profils (ici $r=(1/3,1/3,1/3)$). Dans ce cas précis, la plupart des joueurs vont percevoir une part similaire de gains à la fin du processus. Ces résultats montrent qu'en prenant en compte les trois sensibilités différentes dans le calcul de répartition des gains, l'objectif commun contribue à répondre à chaque objectif individuel de façon similaire. En d'autres termes, la maximisation du taux d'autoconsommation collectif permet de répondre équitablement aux trois sensibilités présentes au sein de la communauté.

Une autre conclusion intéressante est que si les profils dans la communauté sont équitablement répartis et si la pondération au niveau de la fonction caractéristique reflète les profils présents dans la communauté, alors les caractéristiques des concepts de distribution par théorie des jeux s'estompent. Cela signifie que poursuivre un objectif unique d'autoconsommation collective permet de répondre équitablement à ces trois problématiques. Un déséquilibre dans cette répartition permet de retrouver des distributions spécifiques aux concepts de la théorie des jeux, poursuivant des philosophies différentes, comme présenté dans l'application de la section 4.1.4. Dans de futurs travaux, il serait intéressant de déterminer les seuils de répartition des profils à partir desquels les répartitions de gains commencent à suivre ces différentes philosophies.

4.3 Diminuer le temps de calcul de la résolution du jeu

4.3.1 Identification de la problématique dans la littérature

La principale contrainte technique des jeux collaboratifs réside dans le temps de calcul nécessaire pour calculer les distributions de gains. Cette contrainte rend les jeux coopératifs applicables qu'à de petites communautés. Lorsque les jeux sont appliqués à des systèmes de gestion énergétique, le nombre de joueurs est limité à une dizaine de joueurs, comme le résume le tableau 4.7.

Référence	Taille du jeu [joueurs]
[113]	6
[115]	9
[204]	4
[205]	12
[206]	10
[207]	10
[209]	10
[210]	9
[213]	5
[214]	3
[215]	3
[216]	6
[217]	6
[218]	3
[219]	6
[220]	8

TABLEAU 4.7 – Exemples de gestion de l'énergie basée sur des jeux collaboratifs

Plusieurs travaux ont déjà proposé des méthodologies pour pallier à cette problématique. Parmi celles-ci, les suivantes ont été identifiées :

- Les techniques de décomposition : la décomposition de Benders est l’une de ces méthodes [221, 213], qui s’est avérée quatre fois plus rapide que les méthodes de calcul conventionnelles pour calculer le Nucleolus.
- L’approximation linéaire : méthodologie proposée dans [222] pour calculer la valeur de Shapley, offrant une alternative aux calculs exacts.
- La programmation parallèle : cette méthode permet de résoudre efficacement de grands jeux. Par exemple, [223] a utilisé la programmation parallèle distribuée pour résoudre un jeu avec 1000 joueurs en 6 minutes et 40 secondes. Sans cette méthode, il serait impossible de résoudre de tels jeux.

Une autre méthode revient à diviser le jeu en jeux plus petits. En résolvant ces sous-jeux de manière indépendante, puis en agrégeant les résultats, le temps de calcul est considérablement réduit. [224] a utilisé cette approche en regroupant les participants sur la base de leurs profils énergétiques. La méthode a permis de diviser par trois le temps de calcul par rapport aux méthodes traditionnelles de jeux collaboratifs pour 10 joueurs.

Cette dernière solution est celle retenue dans ces travaux de recherche. Son désavantage principal est qu’en modifiant la composition du jeu en termes de joueurs, la contribution individuelle au sein de l’ensemble de la communauté n’est plus exactement la même. La distribution des gains par le concept de la théorie des jeux va donc logiquement différer.

Cette approche a tout de même été retenue, car elle permet d’explorer de nouvelles opportunités en termes de gestion énergétique. L’intérêt de la théorie des jeux dans ces travaux ne réside pas dans la récompense idéale d’un joueur en fonction de sa contribution, mais plutôt dans un objectif d’inciter à des changements de comportements énergétiques. En effet, dans tous les cas, si la stabilité du jeu est respectée, chaque foyer obtiendra une récompense supérieure à ce qu’il aurait pu prétendre seul. De plus, résoudre le jeu par une méthode de sous-division de jeu pourrait permettre de répondre à des problématiques propres à une gestion énergétique. Ces apports seront discutés par la suite.

4.3.2 Méthodologie

La solution proposée dans ces travaux consiste à regrouper les foyers en grappes de 3 joueurs grâce à des méthodes de clustering. Le clustering est réalisé à l'aide de la méthode K-means, disponible dans la bibliothèque open source Scikit-learn [225]. Grâce à cette méthode, des grappes de joueurs sont constituées en fonction de leur distance à la moyenne sur le paramètre de regroupement. Par exemple, si le paramètre considéré est la consommation d'énergie, les joueurs dont les consommations ont une distance similaire à la moyenne de l'ensemble des consommations seront groupés ensemble. Les grappes formées représentent des sous-jeux plus petits qui seront résolus individuellement. Une fois ces sous-jeux résolus, le jeu total composé des sous-jeux est alors résolu, les clusters représentant les joueurs du jeu global. Ainsi, la distribution des gains se fait d'abord en prenant en compte les grappes comme des joueurs à part entière dans le jeu, puis par la composition de ces grappes. La Figure 3.3 rappelle la méthodologie initiale de ce travail, et la Figure 4.13 présente la méthodologie permettant de réduire le temps de calcul du jeu.

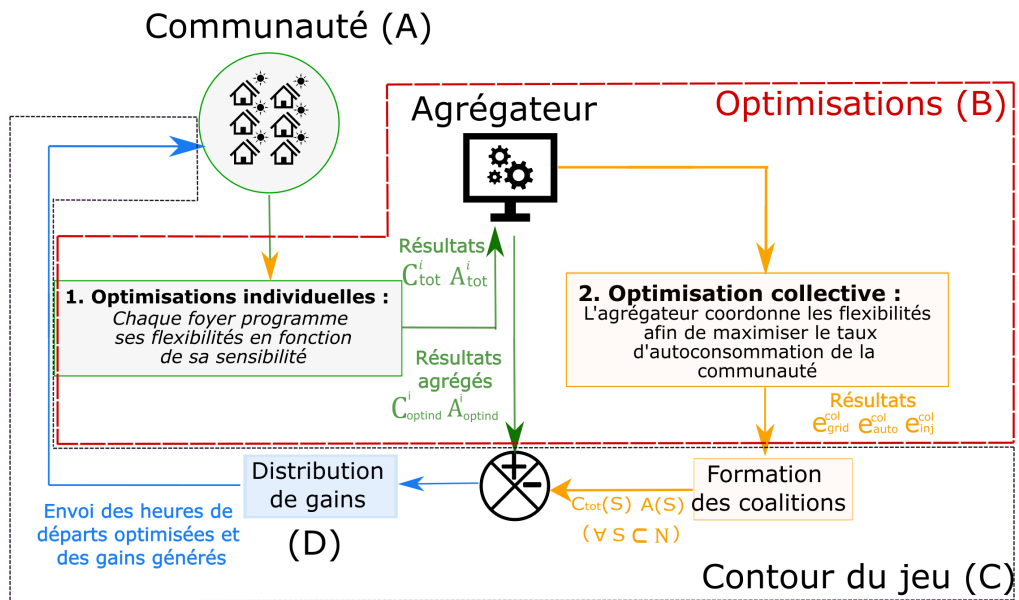


Figure 3.3 : Méthodologie et processus d'optimisation

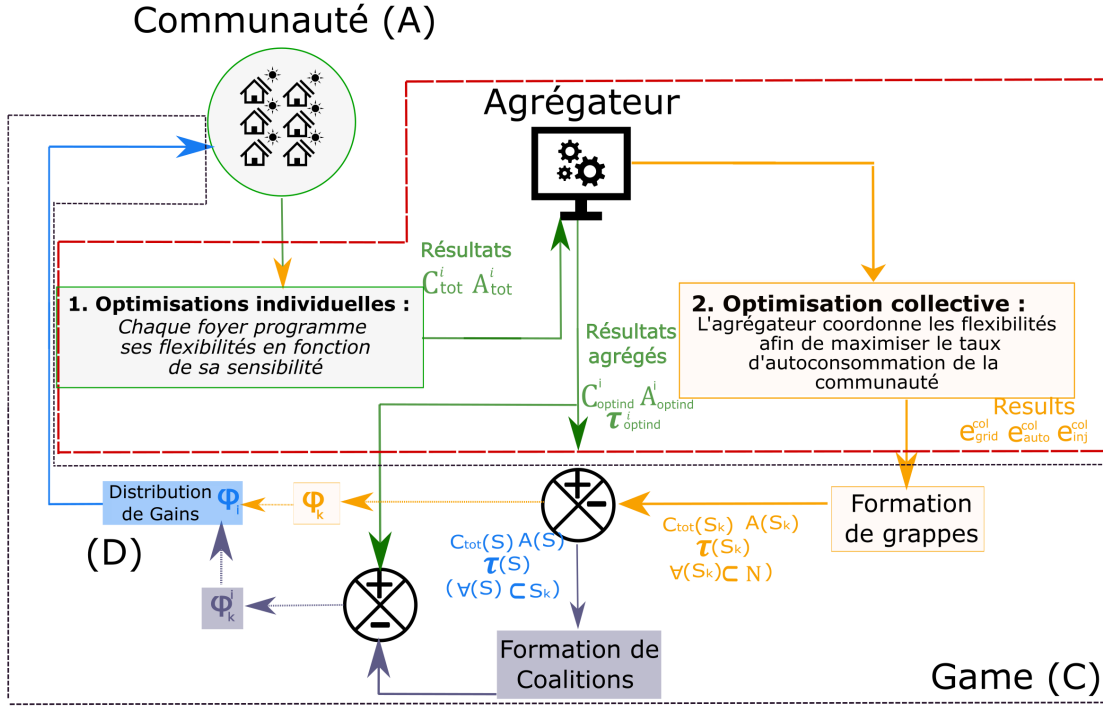


FIGURE 4.13 – Méthodologie et processus d’optimisation avec méthode de réduction du temps de calcul

Pour rentrer dans le détail, les foyers sont regroupés en grappes dans lesquelles chaque participant est similaire sur un paramètre (par exemple sur les consommations d’énergie). Une première distribution est attribuée à chaque grappe k . La fonction caractéristique $\mathcal{V}(S)$ est calculée pour toutes les coalitions possibles de grappes S_k . Les concepts de distribution de gains sont ensuite générés. En considérant la valeur de Shapley, une grappe se voit attribuer le gain φ_k . Ensuite, dans chaque groupe, la valeur de Shapley φ_k^i est générée pour les joueurs composant la grappe. Le calcul de cette distribution par valeur de Shapley est présenté dans la Figure 4.14. La même démarche est effectuée pour le Nucleolus. Le gain financier distribué au joueur i est donné par l’Equation (4.15) et son impact environnemental évité par l’Equation (4.16).

$$\varphi_{cost}^i = \varphi_k \times \varphi_k^i \times \mathcal{G}_{cost} \quad (4.15)$$

$$\varphi_{env}^i = \varphi_k \times \varphi_k^i \times \mathcal{G}_{env} \quad (4.16)$$

Trois critères de regroupement vont être étudiés :

- Les grappes construites sur la sensibilité des acteurs : les acteurs seront regroupés en fonction de leur profil. Dans ce cas, leur récompense dépendra de leurs stratégies, et si un acteur a la même sensibilité qu'un autre, ils seront récompensés de la même manière.
- Les grappes construites sur l'énergie flexible disponible par personne : les logements sont regroupés en fonction de leur potentiel de consommation flexible. On suppose que les acteurs seront récompensés en fonction de leur contribution à la flexibilité.
- Les grappes construites sur les consommations d'énergie par personne : les logements sont regroupés en fonction de leur consommation d'énergie. Dans ce cas, on suppose que les parties prenantes seront récompensées en fonction de leur consommation d'énergie.

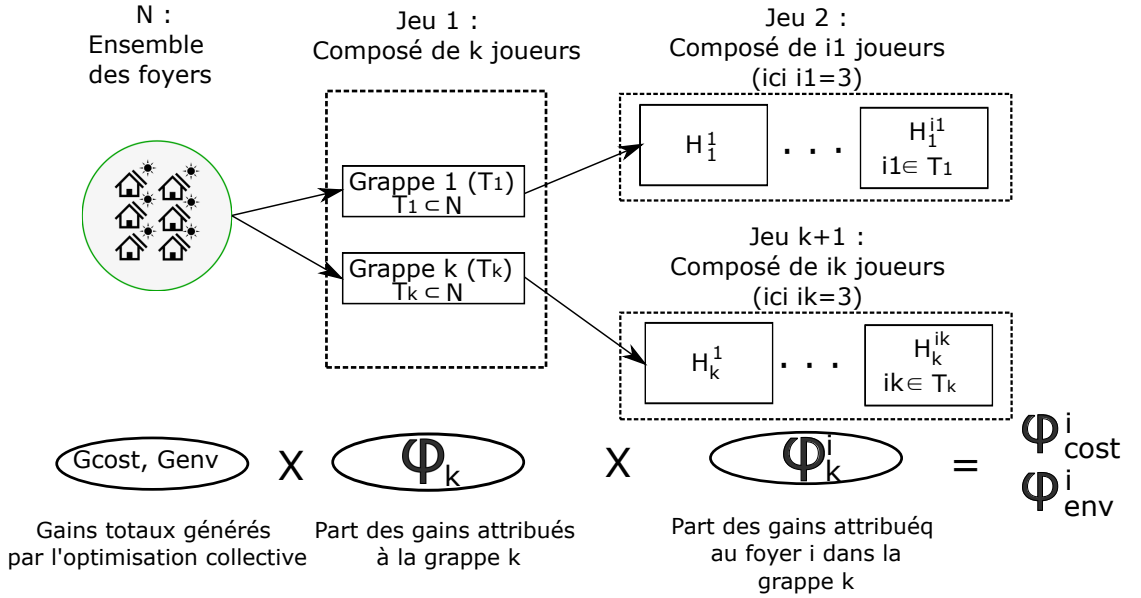


FIGURE 4.14 – Distribution de gains avec méthode de clustering

4.3.3 Application

Appliquons cette méthodologie à la communauté étudiée en 4.2.2. 3 Scénarios vont être appliqués :

- Regroupements des foyers par sensibilité (Scénario 1).
- Regroupements des foyers par énergie flexible disponible (Scénario 2).
- Regroupements des foyers par consommations d'énergie (Scénario 3).

La communauté est composée de 9 foyers regroupés en grappe de 3.

Le tableau 4.8 présente les compositions des grappes en fonction des scénarios. La méthode utilisée appliquée à ce cas d'étude permet de diviser le temps de calcul par 3. Mais la division du jeu en sous-jeux va altérer les concepts de distribution de gains, car les contributions de chaque joueur ne seront plus les mêmes. Les conséquences de cette méthode seront donc discutées ici.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Cluster 0	H4	H3	H0
	H5	H5	H3
	H8	H8	H5
Cluster 1	H2	H0	H4
	H3	H6	H6
	H7	H7	H8
Cluster 2	H0	H1	H1
	H1	H2	H2
	H6	H4	H7

TABLEAU 4.8 – Composition des grappes en fonction des scénarios

Les Figures 4.6 et 4.7 sont également reprises ici car elles permettront de mieux comprendre les résultats obtenus.

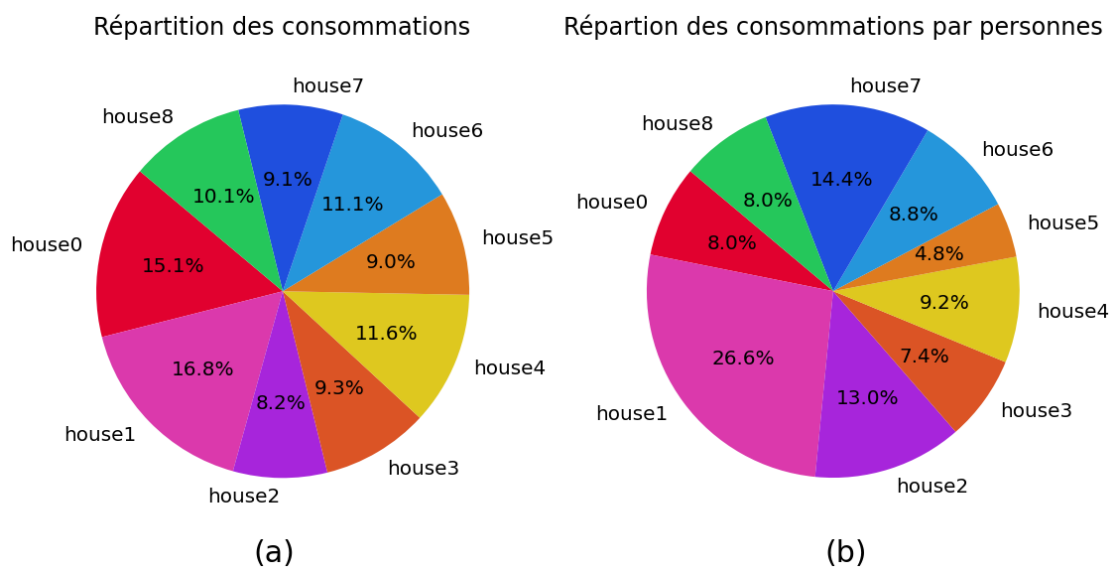


Figure4.6 : Répartition des consommations (a) et des consommations par personne (b) dans la communauté

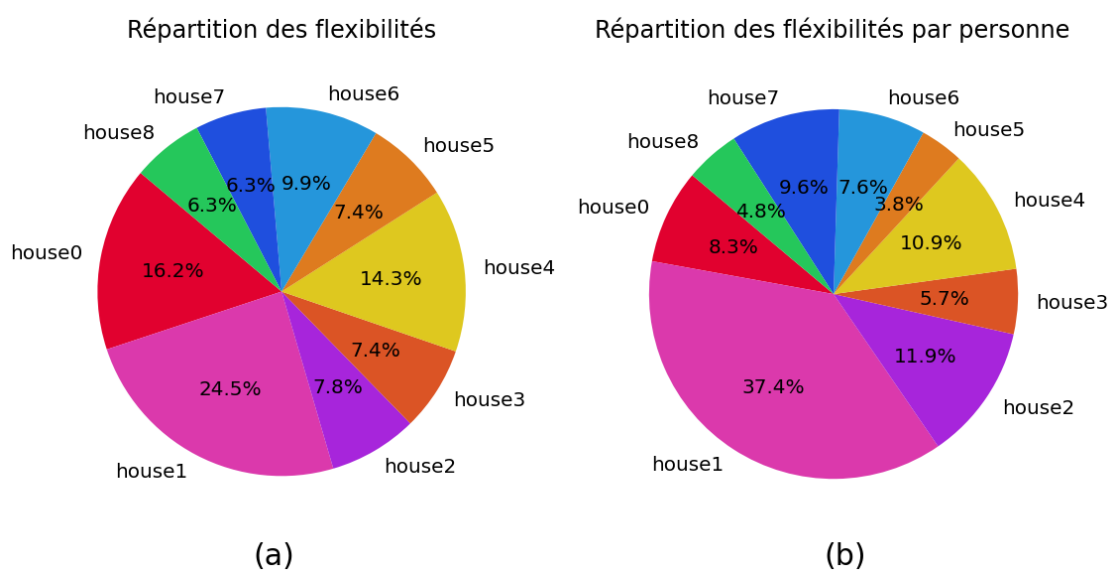


Figure4.7 : Répartition des consommations (a) et des consommations par personne (b) dans la communauté

Scénario 1 : regroupement par sensibilité

Dans ce scénario, les foyers sont regroupés en fonction de leur sensibilité. La Figure 4.15 présente les répartitions par valeur de Shapley et Nucleolus avant et après la méthode de regroupement. Ces résultats sont également repris dans le tableau 4.10.

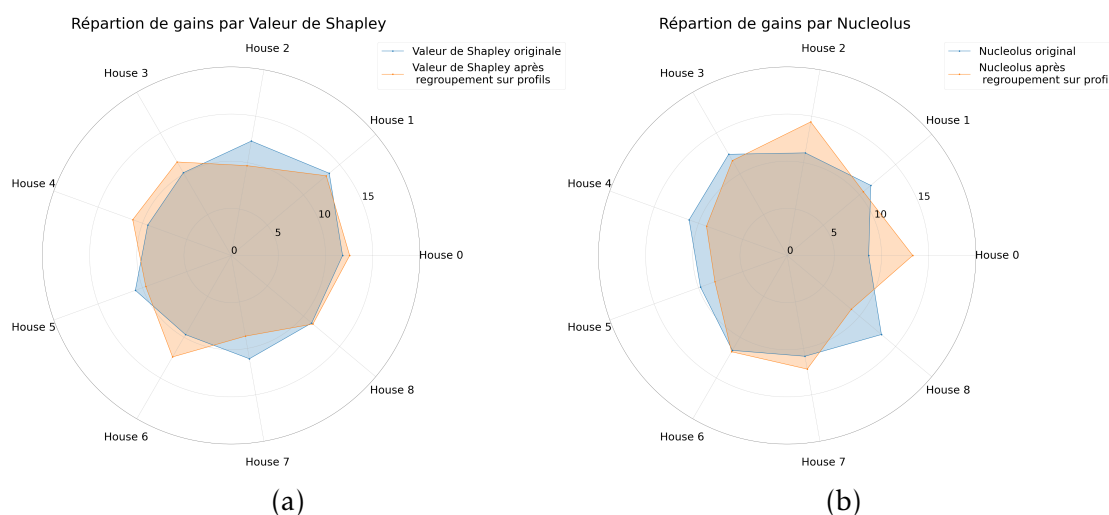


FIGURE 4.15 – Répartition de gains par Valeurs de Shapley (a) et Nucleolus (b) après regroupement par profil

Regrouper les joueurs en fonction de leur sensibilité semble légèrement altérer les répartitions de gains par les deux concepts, et notamment avec le Nucleolus. Les répartitions finales restent cependant proches pour chaque joueur. Les répartitions de gains des joueurs au sein des différentes grappes sont également équitablement réparties. Ce qui mène à l'altération des valeurs est donc la répartition des gains attribuée aux 3 grappes.

La composition des grappes peut mener à la création de « grand joueur », composé de 3 joueurs individuels, qui possède un impact significatif sur la communauté. En effet, en reprenant les Figures 4.6 et 4.7, le Cluster 2 représente 43% des consommations et 50.6% des flexibilités disponibles de la communauté alors que le Cluster 1 ne représente que respectivement 26.6% des consommations et 21.5% des flexibilités de la communauté. En reprenant les conclusions établies en 4.2.1, il est possible d'expliquer les résultats. Le Cluster 2 est logiquement le

cluster le plus récompensé par valeur de Shapley, car il représente la majeure partie des flexibilités de la communauté. C'est aussi parce qu'il représente une grande partie des consommations d'énergies de la communauté qu'il maintient une part de gains importante par Nucleolus.

Les résultats pour le Cluster 1 sont plus complexes à analyser. En effet, il est logiquement moins récompensé par la SV car sa contribution en termes de flexibilité est la plus faible. Cependant, malgré des consommations énergétiques faibles, il obtient le meilleur gain par Nucleolus. Le tableau 4.9 présente les valeurs de la fonction caractéristique pour chaque coalition de cluster possible. Il permet d'expliquer ce résultat. En effet, la meilleure coalition est entre le Cluster 0 et le Cluster 2 (en dehors de la grande coalition). Il est possible d'interpréter ce résultat par une augmentation de gains grâce à la coordination des appareils respectifs composant ces clusters en fonction de leur production photovoltaïque associée. Cela signifie que l'alliance entre le Cluster 0 et le Cluster 2 d'un point de vue coordination de flexibilité est plus forte que les autres. Ainsi, le Cluster 1 ne permettant pas aux autres d'augmenter leur gain, il se retrouve systématiquement comme étant le joueur qui pénalise le plus les autres. Ainsi, en suivant le principe du Nucleolus, c'est le cluster qui obtiendra le plus grand gain.

Combinaison	Valeur
$\emptyset$	0.0
Cluster 0	12.1
Cluster 1	9.5
Cluster 2	12.7
Cluster 0, Cluster 1	26.8
Cluster 0, Cluster 2	40.2
Cluster 1, Cluster 2	38.4
Cluster 0, Cluster 1, Cluster 2	100.0

TABLEAU 4.9 – Valeurs de la fonction caractéristique du jeu 1 (scénario 1)

Valeur de Shapley				
Grappe	φ_k	φ_k^i	φ_g^i	φ_i
Cluster 0	32.0%	H4 : 34.6%	H4 : 11.1%	H4 : 9.4%
		H5 : 30.1%	H5 : 9.6%	H5 : 10.8%
		H8 : 35.3%	H8 : 11.3%	H8 : 11.1%
Cluster 1	29.8%	H2 : 32.4%	H2 : 9.7%	H2 : 12.3%
		H3 : 38.4%	H3 : 11.4%	H3 : 10.1%
		H7 : 29.1%	H7 : 8.7%	H7 : 11.1%
Cluster 2	38.1%	H0 : 32.9%	H0 : 12.5%	H0 : 11.8%
		H1 : 34.5%	H1 : 13.1%	H1 : 13.6%
		H6 : 32.6%	H6 : 12.4%	H6 : 9.7%
Nucleolus				
Grappe	O_k	O_k^i	O_g^i	O_i
Cluster 0	26.1%	H4 : 34.8%	H4 : 9.1%	H4 : 11.1%
		H5 : 31.2%	H5 : 8.1%	H5 : 9.8%
		H8 : 33.9%	H8 : 8.9%	H8 : 13.0%
Cluster 1	38.2%	H2 : 37.6%	H2 : 14.4%	H2 : 11.1%
		H3 : 30.4	H3 : 11.6	H3 : 12.4%
		H7 : 32.0	H7 : 12.2	H7 : 10.9%
Cluster 2	35.6%	H0 : 37.3%	H0 : 13.3%	H0 : 8.6%
		H1 : 29.6%	H1 : 10.5%	H1 : 11.6%
		H6 : 33.1%	H6 : 11.8%	H6 : 11.1%

TABLEAU 4.10 – Distribution de gains après méthode de Clustering (Scénario 1)

Scénario 2 : regroupement par flexibilité

Dans ce scénario, les foyers sont regroupés en fonction de leur flexibilité par personne disponible. La Figure 4.16 présente les répartitions par valeur de Shapley et Nucleolus avant et après la méthode de regroupement. Ces résultats sont également repris dans le tableau 4.11.

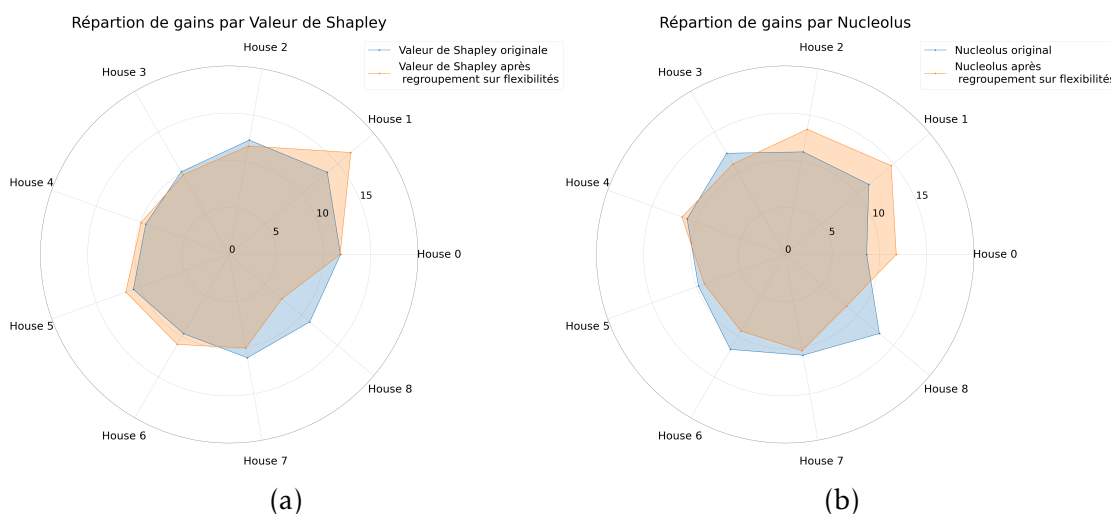


FIGURE 4.16 – Répartition de gains par Valeurs de Shapley (a) et Nucleolus (b) après regroupement par flexibilités disponibles

Dans ce scénario, les distributions finales avant et après le clustering sont légèrement altérées. Concernant la valeur de Shapley, les résultats restent cohérents avec les conclusions précédentes. Le Cluster 0 regroupe le moins de flexibilité, tandis que le Cluster 2 en regroupe le plus. La distribution des gains attribués aux grappes (jeu 1 de la Figure 4.14) suit donc logiquement une approche méritocratique basée principalement sur la flexibilité. Cette logique se retrouve également au sein des clusters, ce qui peut engendrer des disparités dans la distribution des gains lors de la résolution du jeu par clusters.

Les foyers H3 et H5 sont plus flexibles que le foyer H8 au sein du Cluster 1. Le foyer H5 est par ailleurs moins consommateur que le foyer H8, ce qui lui confère un avantage avant les efforts de flexibilité. C'est pour cela que dans ce cluster, il perçoit plus de gains que les autres. La même conclusion peut s'appliquer aux membres du Cluster 2.

Le Nucleolus, quant à lui, est une nouvelle fois plus difficile à interpréter. Concernant la distribution dans les clusters, les résultats sont très similaires à ceux de la distribution par valeur de Shapley. Ces résultats rappellent ceux trouvés dans le scénario 1 de la section 4.2.1. Regrouper les joueurs par flexibilité permet de récompenser les contributions des foyers en fonction de ce comportement. Ainsi, une volonté de récompenser les flexibilités dans un programme

de gestion énergétique peut être réalisée grâce à cette méthodologie avec des résultats moins extrêmes que ceux de la proposition faite en 4.2.1. Cependant, comme dans le cas précédent, le jeu se transforme en jeu méritocratique et les attributs du Nucleolus disparaissent.

Valeur de Shapley				
Grappe	φ_k	φ_k^i	φ_g^i	φ_i
Cluster 0	28.7%	H3 : 34.0%	H3 : 9.8%	H3 : 10.1%
		H5 : 40.6%	H5 : 11.6%	H5 : 10.8%
		H8 : 25.4%	H8 : 7.3%	H8 : 11.1%
Cluster 1	32.8%	H0 : 35.8%	H0 : 11.7%	H0 : 11.8%
		H6 : 33.5%	H6 : 11.0%	H6 : 9.7%
		H7 : 30.7%	H7 : 10.1%	H7 : 11.1%
Cluster 2	38.4%	H1 : 43.8%	H1 : 16.8%	H1 : 13.6%
		H2 : 30.4%	H2 : 11.7%	H2 : 12.3%
		H4 : 25.8%	H4 : 9.9%	H4 : 9.4%
Nucleolus				
Grappe	O_k	O_k^i	O_g^i	O_i
Cluster 0	28.7%	H3 : 38.6%	H3 : 11.1%	H3 : 12.4%
		H5 : 31.8%	H5 : 9.1%	H5 : 9.8%
		H8 : 29.6%	H8 : 8.5%	H8 : 13.0%
Cluster 1	31.5%	H0 : 37.4%	H0 : 11.8%	H0 : 8.6%
		H6 : 29.8%	H6 : 9.4%	H6 : 11.6%
		H7 : 32.9%	H7 : 10.3%	H7 : 10.9%
Cluster 2	39.8%	H1 : 36.8%	H1 : 14.7%	H1 : 11.6%
		H2 : 33.9%	H2 : 13.5%	H2 : 11.1%
		H4 : 29.3%	H4 : 11.6%	H4 : 11.1%

TABLEAU 4.11 – Distribution de gains après méthode de Clustering (Scénario 2)

Scénario 3 : regroupement par consommations énergétiques

Dans ce scénario, les foyers sont regroupés en fonction de leurs consommations d'énergie par personne. La Figure 4.17 présente les répartitions par

valeur de Shapley et Nucleolus avant et après la méthode de regroupement. Ces résultats sont également repris dans le tableau 4.12.

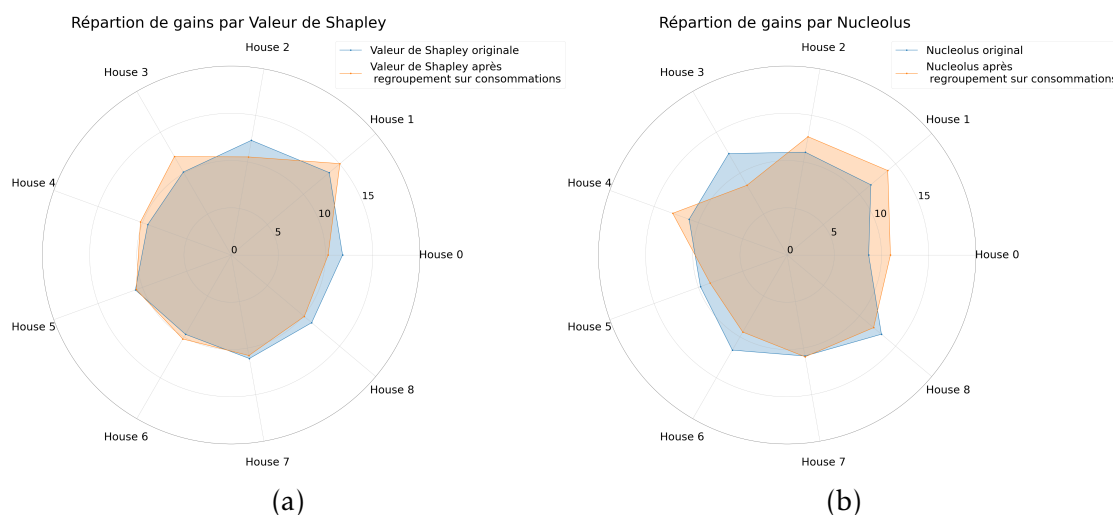


FIGURE 4.17 – Répartition de gains par Valeurs de Shapley (a) et Nucleolus (b) après regroupement par consommations d'énergie

Le regroupement sur ce paramètre est celui qui respecte le mieux les valeurs originales du jeu. Les concepts sont un peu altérés, mais la forme de la répartition des gains est proche de celle de la répartition des gains sans division du jeu. Une des explications provient de l'homogénéité des consommations d'énergie dans la communauté. En effet, il existe de grandes disparités en termes de consommation par personne, mais les consommations totales par foyer sont dans le même ordre de grandeur. Regrouper les foyers en fonction des consommations énergétiques par personne permet de créer des groupes homogènes, ce qui permet de créer un jeu de grappes qui représente bien l'ensemble des joueurs. L'ensemble des jeux résolus se rapproche donc du jeu original. Bien sûr, les contributions des joueurs ne sont pas exactement les mêmes dans les deux cas, c'est ce qui crée certaines petites différences. Grâce à ce scénario, il est possible de conclure que diviser un jeu en fonction d'un paramètre réparti de façon homogène permet de se rapprocher de la distribution de gain originale avant toute division. Cela peut être intéressant dans le cas où la solution est développée dans une grande communauté, mais que l'agrégateur souhaite garder les propriétés de la théorie des jeux.

Valeur de Shapley				
Grappe	φ_k	φ_k^i	φ_g^i	φ_i
Cluster 0	33.0%	H0 : 31.1%	H0 : 10.3%	H0 : 11.8%
		H3 : 36.4%	H3 : 12.0%	H3 : 10.1%
		H5 : 32.4%	H5 : 10.7%	H5 : 10.8%
Cluster 1	30.6%	H4 : 33.4%	H4 : 10.2%	H4 : 9.4%
		H6 : 33.5%	H6 : 10.3%	H6 : 9.7%
		H8 : 33.1%	H8 : 10.1%	H8 : 11.1%
Cluster 2	36.4%	H1 : 28.1%	H1 : 10.2%	H1 : 13.6%
		H2 : 19.7%	H2 : 7.2%	H2 : 12.3%
		H7 : 20.2%	H7 : 7.3%	H7 : 11.1%
Nucleolus				
Grappe	O_k	O_k^i	O_g^i	O_i
Cluster 0	28.2%	H0 : 38.9%	H0 : 10.9%	H0 : 8.6%
		H3 : 30.3%	H3 : 8.5%	H3 : 12.4%
		H5 : 30.9%	H5 : 8.7%	H5 : 9.8%
Cluster 1	34.3%	H4 : 37.7%	H4 : 12.9%	H4 : 11.1%
		H6 : 27.5%	H6 : 9.4%	H6 : 11.6%
		H8 : 34.9%	H8 : 11.9%	H8 : 13.0%
Cluster 2	37.6%	H1 : 37.0%	H1 : 13.9%	H1 : 11.6%
		H2 : 33.8%	H2 : 12.7%	H2 : 11.1%
		H7 : 29.1%	H7 : 10.9%	H7 : 10.9%

TABLEAU 4.12 – Distribution de gains après méthode de Clustering (Scénario 3)

4.3.4 Conclusion

La méthode a prouvé son efficacité en termes de réduction du temps de calcul. Toutefois, l'altération des concepts de distribution de gains issus de la théorie des jeux est inévitable, car la composition du jeu est différente. Les formations de coalitions diffèrent du jeu original et les contributions des joueurs ne sont, en conséquence, plus les mêmes. L'intérêt de ce paragraphe est de discuter des conséquences de la division du jeu et des possibilités d'appliquer cette méthode en étant conscient des effets de la division du jeu.

Une première conclusion intéressante est que si un jeu est divisé en fonction de valeurs homogènes, la méthodologie permet d'approximer les distributions de gains originales en considérant le jeu complet. Ainsi, si l'objectif d'une communauté est de distribuer des gains selon les philosophies des solutions proposées par la théorie des jeux, mais que le nombre de joueurs est trop grand pour l'appliquer directement, il est possible d'appliquer ce principe.

Dans le cas de paramètres de division de jeu hétérogènes, la méthodologie peut être utilisée pour poursuivre des objectifs précis. Par exemple, regrouper les foyers en fonction de leur flexibilité disponible a permis de construire une distribution de gains méritocratique basée sur les contributions des foyers en termes de flexibilité. Les philosophies originales des concepts ne sont plus respectées, notamment pour le Nucleolus, mais la méthode peut être utilisée dans des situations précises.

La rationalité du jeu est respectée dans les trois cas étudiés. Toutefois, la composition sociale de la communauté pourrait compromettre cette rationalité. En effet, l'ensemble des répartitions de profils dans la communauté a été testé. Il existe 1680 répartitions possibles de profils dans une communauté de 9 joueurs avec 3 profils équitablement répartis. Parmi ces 1680 possibilités, 1508 respectent la rationalité du jeu sur les trois méthodes. Cette problématique se retrouve dans le scénario 1, ce qui explique que les philosophies des concepts ne sont pas totalement respectées. Chaque foyer poursuit des objectifs différents avec des moyens variés en termes de flexibilité et de consommation globale d'énergie. Ainsi, avant toute mise en œuvre de la solution, il est nécessaire d'étudier attentivement la composition de la communauté en termes de répartition des profils et des moyens disponibles pour participer à la communauté. Le risque est d'appliquer la méthode de clustering sans considérer ce paramètre et d'obtenir un jeu qui ne respecte pas la rationalité et les objectifs initiaux.

4.4 Conclusion du chapitre

Après avoir discuté des gains que génère l'optimisation collective au Chapitre 3, la question principale reposait sur la méthode de rétribution de ceux-ci parmi les foyers composant la communauté. Le choix s'est tourné vers des

concepts éprouvés de la théorie des jeux. Ceux-ci ont d'abord été observés dans un cadre purement financier pour en déterminer les caractéristiques et discuter ses résultats quand ils sont appliqués à une gestion énergétique. Les résultats sont prometteurs puisque les concepts permettent de respecter la rationalité du jeu, c'est-à-dire que chaque foyer de la communauté aura un intérêt à participer à la gestion collective puisque la réduction sur sa facture sera plus importante après l'opération collective que ce qu'il aurait pu prétendre seul.

Trois questionnements ont alors émergé. Premièrement, comment récompenser certains comportements énergétiques tels la flexibilité ou la sobriété énergétique. Pour cela, un système de score a été étudié, fournissant des résultats intéressants puisqu'il est efficace dans l'objectif recherché. Grâce à celui-ci, il est possible de rediriger de façon significative la répartition des gains en fonctions des comportements que l'on souhaite récompenser. Cependant, l'utilisation de ce système de score doit se faire en connaissance de cause, car il peut affecter la philosophie des concepts et mettre en péril la rationalité du jeu. Le dernier scénario a également permis de valider l'hypothèse que la quantité d'énergie consommée et les flexibilités sont les paramètres les plus importants dans les calculs de répartitions de gains.

Ensuite, l'ouverture à la multidisciplinarité des concepts a été nécessaire. Pour cela, le choix s'est porté sur l'intégration des stratégies individuelles dans le calcul de la fonction caractéristique. Cette méthode a permis de mettre en évidence que l'objectif collectif de maximisation du taux d'autoconsommation permet, dans le cas d'étude, de répondre équitablement aux trois objectifs individuels intégrés dans les scénarios. En effet, les gains perçus par chaque joueur sont similaires, prouvant l'intérêt de l'autoconsommation collective dans la recherche de ces trois objectifs.

Enfin, la principale contrainte des jeux collaboratifs se situe dans son application à de larges communautés. Le temps de calcul pour leur résolution augmente exponentiellement avec le nombre de joueurs. Pour répondre à cette problématique, une méthode de division de jeu a été proposée. Celle-ci permet de diminuer le temps de calcul, mais apporte des résultats intéressants à exploiter dans le cadre de la gestion énergétique. Premièrement, la répartition des idéaux types au sein de la population, associée aux moyens de participer

à une gestion en terme de flexibilité et d'efficacité énergétique des appareils, a un impact significatif sur la distribution de gains finale. Deuxièmement, une division de jeu basée sur un paramètre réparti de façon homogène dans la communauté permet de mieux conserver les répartitions de gains originales et donc de respecter les philosophies des concepts de la théorie des jeux. Cette conclusion est importante à retenir puisque si une communauté souhaite exploiter ce genre de solution tout en respectant la philosophie de la théorie des jeux, il est possible de le faire. Enfin, une division du jeu basée sur un paramètre réparti de façon hétérogène dans la communauté va fortement altérer les concepts de distribution originaux. Cette particularité peut tout de même être exploitée en conscience pour récompenser certains comportements.

L'ensemble des limites et des perspectives sur la suite de ces travaux de thèse sera présenté dans le dernier chapitre.

Conclusion et perspectives

Sommaire du présent chapitre

5.1 Conclusion	175
5.2 Perspective des travaux de recherche	177
5.2.1 Les limites du modèle	178
5.2.2 Les opportunités pour les Sciences Sociales	181
5.2.3 Un calcul d'impact environnemental à approfondir .	183
5.3 Une supervision énergétique mais pas seulement ?	184

5.1 Conclusion

Dans ces travaux de thèse, une nouvelle méthode de gestion de l'énergie s'appuyant sur la coopération a été présentée. Cette méthodologie repose sur le partage d'énergie renouvelable et sur la coordination de programmations d'appareils flexibles.

En plus de cette approche innovante, ces travaux ont apporté deux contributions majeures.

Premièrement, une méthode de quantification des impacts environnementaux basée sur l'Analyse sur Cycle de Vie (ACV) a été proposée. La majorité des travaux sur les problématiques de gestion énergétique ne quantifient pas,

ou seulement partiellement, ces impacts, bien que la problématique environnementale soit l'un des moteurs de la transition énergétique. La méthode proposée est certes imparfaite et incomplète (des axes de poursuite de recherche seront présentés en perspective), mais elle offre une première approche pour construire une méthodologie plus complète à l'avenir. Il est en effet nécessaire de s'intéresser à cette problématique car les résultats obtenus remettent en question les bénéfices des systèmes de gestion énergétique automatisés. En considérant l'ensemble des impacts environnementaux agrégés sous forme de score, les systèmes de gestion automatique semblent avoir un impact environnemental négatif sur une année, selon les hypothèses retenues dans ces travaux, en comparaison avec une communauté possédant un système de production d'énergie renouvelable sans infrastructures automatiques. Ces résultats ont bien entendu des limites, mais prouvent la nécessité d'un véritable champ de recherche dans ce domaine.

La deuxième contribution est le caractère multidisciplinaire des travaux. De nombreuses solutions technologiques performantes sont présentées dans la littérature scientifique. Cependant, leur mise en application est parfois complexe et les performances attendues ne sont pas toujours obtenues. Dans ces travaux, un effort de compréhension et d'application des Sciences Humaines et Sociales (SHS) dans un contexte d'ingénierie a été fait. Pour cela, des idéaux-types issus de la sociologie ont été introduits dans le système de supervision. L'objectif était de prouver que, quelles que soient les motivations à participer dans une communauté d'énergie, le système présenté permet de répondre aux attentes de chacun. Un modèle économique a été proposé grâce à la théorie des jeux, en particulier sa branche coopérative.

Pour prouver l'intérêt d'une gestion collective de l'énergie, une comparaison entre le système de gestion proposé et un ensemble d'optimisations individuelles a été établie. Lorsqu'une quantité suffisante d'énergie photovoltaïque est produite, la gestion collective permet de réduire la facture globale de la communauté et son impact environnemental. En d'autres termes, la communauté bénéficie davantage de la gestion collective que de l'optimisation individuelle des consommations énergétiques de chaque foyer.

Ces gains sont générés à l'échelle collective, et la question qui s'est alors

posée a été : comment répartir équitablement ces gains parmi les participants de la communauté. Le choix s'est porté sur des concepts éprouvés de la théorie des jeux pour distribuer les gains en suivant certaines philosophies. Deux concepts ont été retenus : la valeur de Shapley et le Nucleolus. La première permet une distribution méritocratique des gains, tandis que la philosophie du second se base plutôt sur la solidarité.

Comment adapter ces concepts à un contexte énergétique ? Une première solution a été d'orienter les récompenses vers certains efforts tels que la flexibilité ou la sobriété. Ensuite, pour prendre en compte toutes les sensibilités de la communauté, une fonction caractéristique spécifique à notre contexte a été construite. Enfin, le principal inconvénient des jeux collaboratifs est le temps de calcul nécessaire pour les résoudre. Pour répondre à cette problématique, une solution basée sur une division du jeu a été proposée. Les résultats semblent intéressants à explorer dans de futurs travaux pour permettre d'élargir la méthodologie à de grandes communautés.

L'ensemble des résultats a permis de poser plusieurs questions d'ordre éthique et organisationnel tout au long des travaux. Quels comportements doivent être récompensés ? Qu'est-ce qu'une distribution juste des gains dans une communauté d'énergie ? En quoi la méthodologie pourrait-elle répondre à des problématiques sociales et environnementales ? L'objectif de ces travaux n'était pas de répondre à ces questions, mais de proposer une méthode permettant d'exploiter la solution de la meilleure façon possible en fonction des contextes. Suivant les objectifs poursuivis, il est possible d'ajuster la méthodologie en fonction des comportements à récompenser et de la philosophie souhaitée. Beaucoup de configurations sont possibles et les apports de travaux futurs seront discutés dans la prochaine section. Certaines limites du modèle ont aussi été identifiées et seront également discutées.

5.2 Perspective des travaux de recherche

Les limites et les futurs travaux identifiés durant le travail de thèse sont présentées dans cette section. Beaucoup de points évoqués n'ont pas été explorés par manque de temps ou de compétences spécifiques, mais mériteraient un

approfondissement dans de futurs travaux.

5.2.1 Les limites du modèle

La limite technique

Comme évoqué en 3.4.3, l'utilisation de l'algorithme par essaim particulière permet de parcourir les espaces d'optimisation plus rapidement, mais ne garantit pas d'obtenir l'optimum global de la fonction objectif. La méthode d'optimisation a plutôt été utilisée pour résoudre les problèmes rapidement pour observer et discuter les résultats d'une gestion collective de l'énergie. De plus, la méthodologie reposant sur une supervision énergétique à J-1, il était admis que ne pas trouver l'optimum global n'était pas une priorité, car les aléas du temps réel peuvent remettre en question la gestion prévue à J-1. Pour la suite des travaux, d'autres algorithmes d'optimisation spécifiques pourraient être développés afin d'améliorer l'efficacité du système.

Une méthode d'optimisation plus efficace permettrait également d'approfondir la question des impacts environnementaux annuels d'une communauté d'énergie. Cela permettrait d'avoir des résultats d'optimisation plus précis qui pourraient générer une estimation des impacts environnementaux plus précise et des axes d'actions à explorer.

Estimer avec précision les impacts environnementaux des systèmes de gestion énergétique automatique est complexe. En effet, il faudrait réussir à estimer la quantité d'énergie déplacée grâce à ces technologies et évaluer l'impact de ce déplacement des consommations. Le système est dynamique et peut varier fortement en fonction des périodes étudiées. Pour estimer l'impact environnemental évité par une solution, il est nécessaire de connaître le mix énergétique exact du lieu étudié, c'est-à-dire des données les plus locales possibles. Il faut ensuite être capable d'estimer quel moyen de production n'a pas été sollicité grâce aux déplacements de consommations. Or, cette variable dépend de nombreux paramètres externes à la volonté de réduire l'empreinte environnementale : la non-sollicitation d'une source de production peut être motivée par des contraintes techniques ou économiques.

Les limites de données

Toutes les données utilisées dans ce travail proviennent de logiciels de simulation, d'historiques ou de bases de données spécifiques. Ainsi, les résultats présentés dans ce travail doivent être interprétés dans ce contexte. La position géographique de la communauté étudiée définit en partie les consommations et la production énergétique. De plus, les pratiques énergétiques peuvent également varier d'une région à une autre. Les consommations des appareils sont des profils génériques, mais la diversité des appareils sur le marché pourrait déboucher sur des profils énergétiques différents.

Le système a été étudié dans un contexte de mix énergétique français. Dans d'autres contextes, les résultats pourraient être différents. De même, les hypothèses concernant les coûts de l'énergie peuvent varier. Les prix Spot de l'année 2019 ont été pris en référence pour éviter que les résultats ne soient affectés par des variations fortes du marché après l'épidémie de COVID-19 et les contextes géopolitiques qui ont suivi. Cependant, rien ne garantit que les prix de l'énergie reviendront aux niveaux observés en 2019.

Les données qui ont permis l'étude ACV sont issues de la base de données Ecoinvent. Cependant, pour une étude précise, il faudrait étudier de manière exhaustive l'ensemble des composants spécifiques des réseaux de transmission et de distribution. Cela inclurait l'identification des matières premières utilisées, ainsi que la définition des processus de fabrication, de déploiement et de fin de vie des différents composants. Le même processus devrait être appliqué au système de gestion énergétique au sein de la communauté. Enfin, comme présenté en 3.3.3, la pondération des impacts environnementaux dépend des problématiques locales et ces contextes doivent être considérés dans chaque étude spécifique.

Les limites d'application

L'ensemble des résultats présentés dans ce travail de thèse sont issus de simulations qui n'ont pas été testées en condition réelle. En effet, le faible développement pour le moment des communautés d'énergies en France associé aux réglementations concernant les données restreignent très fortement l'accès

à ce type d'expérimentation. Il serait donc intéressant dans de futurs travaux d'appliquer cette démarche dans un contexte d'expérimentation, d'autant plus que plusieurs questions peuvent se poser en condition réelle. Par exemple, que se passerait-il si finalement un foyer ne suit pas la stratégie développée en J-1 ? Quel est l'impact sur l'optimisation globale, sur la génération de gains ? D'un point de vue éthique et organisationnel, comment répartir les potentiels gains générés par la communauté ? En effet, le foyer qui n'aurait pas coopéré risquerait de déstabiliser le jeu et pourrait pénaliser d'autres joueurs. Alors doit-il être pénalisé ou la communauté doit-elle porter la responsabilité pour maintenir une cohésion de groupe ?

Lors de la distribution de gains, si un foyer se voit attribuer un gain négatif, il n'a plus d'intérêt à participer à l'opération et la stabilité du jeu est compromise. Lorsque ce type de distribution est généré, doit-on garder l'attribution de gain d'un foyer négatif, en émettant l'hypothèse qu'il récupérera ses pertes les jours suivants ? Où bien l'ensemble de la communauté doit-elle se répartir ces pertes pour que ce foyer obtienne ce qu'il aurait obtenu de mieux individuellement ? Dans ce cas, comment se ferait cette répartition ? Ces questions se sont posées tout au long du travail, mais sans une véritable étude il est difficile d'y répondre. Nous touchons ici des questions d'ordre éthique qui méritent sans doute d'être discutées au cas par cas dans chaque communauté propre, car cela dépend des règles que la communauté se fixe. Pour fournir quelques pistes pour y répondre, il peut y avoir des solutions techniques dans certains cas. En effet, il a été observé lors de certaines simulations que l'algorithme collectif agence les appareils de sorte à remplir au maximum la courbe de production. Or certains appareils ont les mêmes caractéristiques au sein de la communauté, comme par exemple les chauffe-eaux. Certains foyers se voient alors attribuer des heures de démarrage d'appareil qui ne sont pas optimales individuellement, mais qui le sont collectivement. Cela pourrait être interprété comme une demande de "sacrifice individuel" pour la communauté. Dans ce cas, réarranger les heures de départ des appareils peut permettre de générer des gains pour chaque participant. Où alors proposer une compensation à ce sacrifice pourrait également être possible.

Enfin, dans l'ensemble des scénarios présentés ici, la clef de répartition de l'énergie locale a toujours été la même : chaque participant se voit attribuer la

même quantité d'énergie que les autres. L'hypothèse a été retenue, car si le sujet est positionné sur le partage d'énergie, il semblait logique que chacun se voit attribuer ces mêmes quantités pour des raisons d'équité. Il semblerait que si cette clef de répartition ne se base plus sur ce concept d'équité, alors le jeu se retrouve déséquilibré. En effet, les foyers possédant les plus grandes quantités d'énergies sembleraient récolter plus de gains que les autres. Il n'a pas été possible de valider ces résultats pour des raisons de temps, mais pour de futurs travaux, il serait intéressant de s'intéresser à la question. Si ces hypothèses se vérifient, alors le simple fait de déstabiliser la clef de répartition de l'énergie photovoltaïque pourrait transformer le modèle coopératif en un modèle de marché comme les autres où les gros producteurs auraient intérêt à partager leur énergie avec leurs voisins, ce qui reviendrait à leur vendre cette énergie puisqu'ils se verraient attribuer plus de gains.

La dernière problématique identifiée au cours des travaux est la question de la tarification du réseau. La tarification réglementaire actuelle a été appliquée. Cependant, si une bonne partie des consommations sont absorbées par les moyens de production locaux, alors la quantité d'énergie circulant sur le réseau est de moins en moins importante. Or, le financement des réseaux électriques se fait en partie sur cette circulation d'énergie. Augmenter l'autoconsommation pourrait alors amener à une perte de financement des réseaux non négligeable. En s'inspirant de ces travaux, il serait peut-être possible de revoir le modèle de financement en utilisant un modèle coopératif. La communauté serait l'interlocuteur du Gestionnaire du Réseau de Distribution (GRD) et la distribution des frais d'utilisation du réseau pourrait se faire grâce à la théorie des jeux.

5.2.2 Les opportunités pour les Sciences Sociales

Les travaux présentés dans cette thèse sont interdisciplinaires, intégrant des hypothèses issues des Sciences de l'Ingénieur (SI) et des sciences humaines et sociales (SHS). Cependant, l'orientation principale reste centrée sur les SI en raison de l'objectif final. Des ouvertures vers les SHS sont donc envisageables pour enrichir et compléter ces travaux.

Premièrement, les profils retenus dans ce travail sont des idéaux-types qui

permettent de représenter des comportements spécifiques en simplifiant des hypothèses de motivations pour participer à une communauté d'énergie. Or un foyer n'est pas caractérisé par une motivation unique, comme supposé ici. Une véritable étude sociologique des profils présents dans la communauté étudiée pourrait être menée. Celle-ci pourrait permettre dans un premier temps de valider les hypothèses retenues dans ce travail et de déterminer les proportions de chaque profil en situation réelle.

Une étude concernant l'acceptation du système de gestion serait également intéressante à explorer. En effet, la gestion collective de l'énergie n'est pas répandue et l'acceptation des participants n'est peut-être pas uniquement liée à la proportion de gains qu'ils reçoivent à la fin de la journée comme admis dans ces travaux de thèse. Des questions d'organisation et de gestion de communauté peuvent être soulevées. Que faire si un participant n'est pas capable de suivre la stratégie collective ? Les efforts individuels pour le bon fonctionnement de l'optimisation sont-ils perçus comme justes et équitables ? Même si les concepts de la théorie des jeux sont réputés pour distribuer les gains équitablement, sont-ils perçus de la même manière en conditions réelles ?

Une étude socio-économique de répartition de profils pourrait également être menée. Associée à la méthodologie de division de jeu présentée en 4.3.2, il est peut-être possible d'établir un "livre blanc" sur la construction sociale d'une communauté pour qu'elle soit performante. Celui-ci établirait les seuils de proportion de répartition de profils critiques à partir desquels le système devient performant ou, au contraire, inefficace.

Enfin, en considérant les philosophies du Nucleolus et de la valeur de Shapley, la supervision énergétique développée dans ces travaux pourrait permettre de répondre à des problématiques à la fois sociales et environnementales. Ainsi, un système de récompense méritocratique basé sur la valeur de Shapley permettrait de valoriser les efforts en termes de participation à la gestion des réseaux. Chaque participant est alors récompensé en fonction de sa participation. L'adaptation de la fonction caractéristique pour récompenser spécifiquement ces comportements peut être améliorée.

Le Nucleolus pourrait, quant à lui, se révéler très intéressant dans un contexte de solidarité autour des questions d'énergie. En récompensant les foyers les

moins consommateurs, le concept pourrait encourager les efforts d'efficacité et de sobriété énergétique. Il pourrait également être utilisé pour lutter contre la précarité énergétique. En effet, les foyers les moins consommateurs d'énergie sont parfois ceux en situation de précarité, réduisant leur consommation par manque de moyens financiers. Accorder plus de gains issus d'une gestion énergétique collective pourrait leur permettre d'augmenter leur capacité d'investissement dans des bâtiments et des équipements plus performants. Une étude spécifique à l'utilisation d'une gestion collective de l'énergie pour répondre à cette problématique pourrait constituer une perspective importante de ces travaux.

5.2.3 Un calcul d'impact environnemental à approfondir

Le calcul de l'impact environnemental se fait grâce à une base de données générique et peut être plus précis en étudiant spécifiquement les équipements de la communauté étudiée. De même, les impacts calculés pour la production énergétique proviennent de données nationales. Or les mix énergétiques peuvent différer localement en fonction des taux d'énergies renouvelables déployées localement.

Une estimation précise de l'impact de l'automatisation des moyens de flexibilité nécessite d'évaluer l'impact marginal de l'énergie déplacée. Cela implique d'analyser quel moyen de production n'a pas été activé grâce au décalage des consommations et quelles sources ont été sollicitées à la place. Ce type d'analyse demande une méthodologie précise prenant en compte les contraintes techniques et économiques du marché de l'énergie.

Une autre étude concernant l'impact environnemental serait de regarder les répercussions de l'autoconsommation sur le dimensionnement des réseaux électriques. En effet, plus l'énergie est consommée localement, moins le réseau de transmission est sollicité. Une nuance à cet argument est qu'il faut également estimer les nouvelles contraintes amenées par l'électrification massive de certains usages. Dans tous les cas, si l'autoconsommation se généralise ces prochaines années, un allègement des réseaux de distribution et de transmission est-il possible? Ou bien considérons-nous que pour garantir le service énergétique, il

est nécessaire de maintenir le niveau d'équipement actuel ? Tout cela a un effet non négligeable sur les impacts environnementaux du réseaux. En effet, si le dimensionnement de celui-ci est inchangé et que les moyens d'autoconsommation augmentent, alors l'énergie circulant sur le réseau entraînera une dégradation accrue de l'environnement. Il est nécessaire de considérer l'impact du réseau sur le kWh qui circule sur celui-ci. L'empreinte environnementale du réseau étant défini lors de sa phase de construction, plus la quantité d'énergie circulant sur celui-ci est importante, plus son impact est dilué.

Les travaux ont permis d'établir une première méthodologie simplifiée de l'étude d'impacts environnementaux. La méthodologie ACV est aujourd'hui reconnue comme l'une des plus efficaces pour estimer ce type d'impact. Cependant, l'application de cette méthode à la gestion énergétique est complexe en raison des différentes problématiques présentées précédemment. Il est donc nécessaire d'approfondir la méthodologie présentée dans ces travaux pour éclairer les décisions stratégiques dans ce domaine. Bien que l'atténuation du changement climatique soit aujourd'hui le principal défi, il est crucial que cette lutte ne se fasse pas au détriment d'autres indicateurs environnementaux, qui pourraient être aussi menaçants pour nos sociétés.

5.3 Une supervision énergétique mais pas seulement ?

L'utilisation de méthodes collaboratives pour la gestion énergétique semble prometteuse. La division du jeu en grappes, telle que proposée en 4.3.2, ouvre à une perspective de gestion énergétique à grande échelle. En effet, le système pourrait être étendu d'une communauté au quartier d'une ville, voire à une smart city entière. Pour cela, d'autres combinaisons possibles de joueurs dans des grappes pourraient être explorées. En utilisant des algorithmes d'apprentissage, il pourrait être possible de déterminer les regroupements optimaux de joueurs en fonction de l'objectif de la gestion collective. Ainsi, une smart city pourrait être découpée en quartiers, eux-mêmes décomposés en grappes de communautés, elles aussi divisées en grappes de foyers. Le système de récompense en cascade serait déployé sur plusieurs niveaux. Bien sûr, il faudrait également étudier l'influence d'une décomposition successive du jeu.

La solution proposée pourrait également être utilisée dans un but d'aide à la décision. En effet, grâce au caractère multidisciplinaire des travaux, il serait possible de proposer différents scénarios de gestion énergétique avec des distributions de gains spécifiques. En fonction des caractéristiques techniques et sociales de la communauté et des objectifs des territoires, il serait possible de dégager les tendances énergétiques de la communauté et de définir les actions à mettre en œuvre pour répondre aux problématiques énergétiques locales. Le territoire doit-il développer davantage de moyens de production ? Une incitation à la diminution de la consommation énergétique est-elle prioritaire ? Y a-t-il des inégalités sociales sur le territoire qui se manifestent à travers les comportements énergétiques ?

Enfin, grâce à la méthodologie d'estimation d'impact environnemental, il serait envisageable d'adapter le système de gestion proposé pour l'intégrer à un modèle de type IAM (Integrated Assessment Model, modèle d'évaluation intégrée). En améliorant la méthodologie de calcul d'impact, il serait possible de l'intégrer à l'un de ces modèles pour estimer les impacts environnementaux à long terme. En comparant différents scénarios, cela pourrait aider à développer des politiques environnementales plus efficaces dans lesquelles les comportements énergétiques seraient intégrés.

Bibliographie

- [1] Valérie MASSON-DELMOTTE et al., éd. *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2021. doi : 10.1017/9781009157896.
- [2] Hans-Otto PÖRTNER et al., éd. *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2022.
- [3] P.R.SHUKLA, J. SKEA, R. SLADE, A. AL KHOUDAJIE, R. VAN DIEMEN, D. MCCOLLUM, M. PATHAK, S. SOME, P. et VYAS, R. FRADERA, M. BELKACEMI, A. HASIJA, G. LISBOA, S. LUZ, J. MALLEY, (EDS.)] IPCC, 2022 : *Climate Change 2022 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- [4] « Proceedings of the United Nations Scientific Conference on the Conservation and Utilization of Resources, 17 August - 6 September 1949, Lake Success, New York, Vol. III, Fuel and energy resources ». In : UN Scientific Conference on the Conservation and Utilization of Resources (1949 : Lake Success, N.Y.) UN, 1951. URL : <https://digitallibrary.un.org/record/1485027> (visité le 30/01/2024).
- [5] H. Lee and J. Romero (eds.) CORE WRITING TEAM. « IPCC, 2023 : Summary for Policymakers.] » In : *Climate Change 2023 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (), pp. 1-34. doi : 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- [6] *Hausse des prix de l'énergie depuis 2021*. 17 jan. 2024. URL : <https://www.consilium.europa.eu/fr/infographics/energy-prices-2021/> (visité le 07/02/2024).

- [7] Commissariat général au développement DURABLE. *Accueil*. Chiffres clés de l'énergie - Édition 2022. URL : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2022/> (visité le 07/02/2024).
- [8] *Réglementation environnementale RE2020*. Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-environnementale-re2020> (visité le 07/02/2024).
- [9] *Production mondiale d'électricité : part d'énergie renouvelable*. Statista. URL : <https://fr.statista.com/statistiques/753360/part-energie-renouvelable-dans-la-production-mondiale-electricite/> (visité le 07/02/2024).
- [10] Commissariat général au développement DURABLE. *International*. Chiffres clés de l'énergie - Édition 2021. URL : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/11-international.php> (visité le 27/02/2024).
- [11] *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS The European Green Deal*. 2019. URL : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN> (visité le 09/09/2022).
- [12] *LOI N° 2019-1147 Du 8 Novembre 2019 Relative à l'énergie et Au Climat (1)*. 8 nov. 2019.
- [13] *Territoires à énergie positive pour la croissance verte*. Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/territoires-energie-positive-croissance-verte> (visité le 07/02/2024).
- [14] Agence De l'Environnement et de la MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE(ADEME). *Mix électrique 100% renouvelable? Analyses et optimisations*. La librairie ADEME. URL : <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/2881-mix-electrique-100-renouvelable-analyses-et-optimisations.html> (visité le 08/02/2024).
- [15] Institut NEGAWATT. *Scénario négaWatt 2022*. Association négaWatt. URL : <https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2022> (visité le 08/02/2024).

- [16] *"Futurs énergétiques 2050" - Consommation et production : les chemins de l'électricité de RTE pour la neutralité carbone*. RTE. 18 oct. 2021. URL : <http://www.rte-france.com/actualites/futurs-energetiques-neutralite-carbone-2050-principaux-enseignements> (visité le 08/02/2024).
- [17] RTE. RTE — *Futurs Énergétiques 2050*. URL : <https://rte-futursenergetiques2050.com/> (visité le 08/02/2024).
- [18] *EUR-Lex - 31996L0092 - EN*. Official Journal L 027 , 30/01/1997 P. 0020 - 0029; URL : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A31996L0092> (visité le 27/02/2024).
- [19] *Autoconsommation — Enedis — Observatoire Français de La Transition Écologique*. URL : <https://observatoire.enedis.fr/thematique/autoconsommation/indicateurs> (visité le 28/02/2024).
- [20] *Chapitre V : L'autoconsommation (Articles L315-1 à L315-8) - Légifrance*. URL : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000023983208/LEGISCTA000032939883/#LEGISCTA000032939883 (visité le 12/02/2024).
- [21] Nicolas BOCCARD et Axel GAUTIER. « Solar Rebound : The Unintended Consequences of Subsidies ». In : *Energy Economics* 100 (1^{er} août 2021), p. 105334. ISSN : 0140-9883. DOI : 10.1016/j.eneco.2021.105334. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988321002401> (visité le 17/11/2021).
- [22] *Arrêté Du 19 Septembre 2023 Modifiant l'arrêté Du 21 Novembre 2019 Fixant Le Critère de Proximité Géographique de l'autoconsommation Collective Étendue*.
- [23] *L'accélération du déploiement des technologies intelligentes après l'accident de Fukushima du 11 mars 2011*. Smart Grids - Le site édité par la CRE. URL : <https://www.smartgrids-cre.fr/encyclopedie/le-japon-pays-pionnier-des-smart-grids/lacceleration-du-deploiement-des-technologies-intelligentes-apres-laccident-de-fukushima-du-11-mars-2011> (visité le 13/02/2024).
- [24] *LOI N° 2019-1147 Du 8 Novembre 2019 Relative à l'énergie et Au Climat (1)*. 8 nov. 2019.
- [25] Matthieu STEPHANT. « Optimisation de l'autoconsommation dans une communauté énergétique locale via une blockchain ». Thèse de doct. HESAM Université, mai 2021. URL : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03483996> (visité le 03/01/2022).

- [26] Alyssa Diva MUSTIKA et al. « A Two-Stage Management Strategy for the Optimal Operation and Billing in an Energy Community with Collective Self-Consumption ». In : *Applied Energy* 310 (15 mars 2022), p. 118484. ISSN : 0306-2619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2021.118484. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921017050> (visité le 16/02/2022).
- [27] Anthony ROY et al. « A Comparison of Energy Allocation Rules for a Collective Self-Consumption Operation in an Industrial Multi-Energy Microgrid ». In : *Journal of Cleaner Production* 389 (20 fév. 2023), p. 136001. ISSN : 0959-6526. DOI : 10.1016/j.jclepro.2023.136001. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623001592> (visité le 29/02/2024).
- [28] CEA. *Plateforme Smart Grid multi-énergies*. CEA/CEA-Liten. 27 sept. 2023. URL : <https://www.cea.fr/cea-tech/liten/Pages/Collaborer/Plateformes-Technologiques/Systemes-Smart-Grid.aspx> (visité le 29/02/2024).
- [29] Benoit DURILLON. « ModAICSS : Modélisation de l'acceptation et de l'implication de Producteurs et Consommateurs d'énergie Électrique En Vue d'une Stratégie de Supervision Énergétique Multi-Acteurs ». These de doctorat. Lille, 18 déc. 2019. URL : <https://www.theses.fr/2019LILUI094> (visité le 26/11/2021).
- [30] Frédéric WURTZ et Benoît DELINCHANT. « “Smart Buildings” Integrated in “Smart Grids” : A Key Challenge for the Energy Transition by Using Physical Models and Optimization with a “Human-in-the-Loop” Approach ». In : *Comptes Rendus. Physique* 18.7-8 (2017), p. 428-444. ISSN : 1878-1535. DOI : 10.1016/j.crhy.2017.09.007. URL : <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/physique/articles/10.1016/j.crhy.2017.09.007/> (visité le 29/02/2024).
- [31] *Énergie Partagée*. URL : <https://energie-partagee.org> (visité le 05/07/2022).
- [32] *Accueil - Opération d'Autoconsommation collective Pérenchies*. Energie Collective. URL : <https://www.energiecollectiveperenchies.fr> (visité le 05/07/2022).
- [33] ADMIN8028. *Accueil*. Mine de Soleil. URL : <https://minedesoleil.fr/> (visité le 08/09/2022).
- [34] *Mon énergie by MAESTRO*. Maestro. URL : <https://www.monenergiebymaestro.net/> (visité le 20/01/2022).

- [35] Abderrahman BENCHEKROUN. « Supervision énergétique des réseaux de distribution intégrant des véhicules électriques, des énergies renouvelables, du stockage et des charges passives pilotables ». Thèse de doct. HESAM Université, 15 déc. 2021. URL : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03687537> (visité le 05/07/2022).
- [36] Île d'Ouessant. Smart Grids - Le site édité par la CRE. URL : <https://www.smartgrids-cre.fr/projets/ile-douessant> (visité le 04/11/2021).
- [37] MAIA. Smart Grids - Le site édité par la CRE. URL : <https://www.smartgrids-cre.fr/projets/maia> (visité le 04/11/2021).
- [38] Think SMARTGRIDS. *GUIDE POUR LE DÉPLOIEMENT DES SMART GRIDS DANS LES TERRITOIRES*. URL : <https://www.thinksmartgrids.fr/publications> (visité le 28/02/2024).
- [39] Think SMARTGRIDS. *Le marché français des smart grids en 2030*. URL : <https://www.thinksmartgrids.fr/publications> (visité le 28/02/2024).
- [40] *Horizon 2020 - European Commission*. URL : https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-2020_en (visité le 29/02/2024).
- [41] *Ebalanceplus - Smart Energy Flexibility for Distribution Grids*. ebalanceplus. URL : <https://www.ebalanceplus.eu/> (visité le 27/07/2024).
- [42] *Projects — Energy Communities in Europe*. URL : <https://enercommunities.eu/projects/> (visité le 06/07/2022).
- [43] Elena CARAMIZARU et Andreas UIHLEIN. *Energy Communities : An Overview of Energy and Social Innovation*. JRC Publications Repository. 19 fév. 2020. DOI : 10.2760/180576. URL : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119433> (visité le 06/07/2022).
- [44] Richard J. HEWITT et al. « Social Innovation in Community Energy in Europe : A Review of the Evidence ». In : *Frontiers in Energy Research* 7 (2019), p. 31. ISSN : 2296-598X. DOI : 10.3389/fenrg.2019.00031. URL : <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fenrg.2019.00031> (visité le 22/12/2021).
- [45] Marie-Christine ZÉLEM, Christophe BESLAY et Romain GOURNET. « Pas de "smart Cities" sans "smart Habitants" ». In : *URBIA. Les Cahiers du développement urbain durable*. Mutation Écologique et Transition Énergétique. Vers La Ville Intelligente? 15 (2013), p. 45-60. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03475893> (visité le 09/09/2022).

- [46] B. K. SOVACOO et al. « Integrating Social Science in Energy Research ». In : *Energy Research & Social Science* 6 (1^{er} mars 2015), p. 95-99. ISSN : 2214-6296. DOI : 10.1016/j.erss.2014.12.005. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221462961400139X> (visité le 03/01/2022).
- [47] Gene I. ROCHLIN. « Energy Research and the Contributions of the Social Sciences : A Retrospective Examination ». In : *Energy Research & Social Science* 3 (1^{er} sept. 2014), p. 178-185. ISSN : 2214-6296. DOI : 10.1016/j.erss.2014.04.013. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629614000462> (visité le 03/01/2022).
- [48] A. Fattahi MEYABADI et M. H. DEIHIMI. « A Review of Demand-Side Management : Reconsidering Theoretical Framework ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80 (1^{er} déc. 2017), p. 367-379. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2017.05.207. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117308481> (visité le 08/11/2021).
- [49] Ioannis LAMPROPOULOS et al. « Criteria for Demand Response Systems ». In : *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Juill. 2013, p. 1-5. DOI : 10.1109/PESMG.2013.6672716. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6672716> (visité le 18/03/2024).
- [50] Rasmus LUTHANDER et al. « Self-Consumption Enhancement and Peak Shaving of Residential Photovoltaics Using Storage and Curtailment ». In : *Energy* 112 (1^{er} oct. 2016), p. 221-231. DOI : 10.1016/j.energy.2016.06.039.
- [51] Ehsan REIHANI et al. « Load Peak Shaving and Power Smoothing of a Distribution Grid with High Renewable Energy Penetration ». In : *Renewable Energy* 86 (1^{er} fév. 2016), p. 1372-1379. ISSN : 0960-1481. DOI : 10.1016/j.renene.2015.09.050. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115303293> (visité le 08/07/2022).
- [52] Peizhong Yi et al. « Real-Time Opportunistic Scheduling for Residential Demand Response ». In : *IEEE Transactions on Smart Grid* 4.1 (mars 2013), p. 227-234. ISSN : 1949-3061. DOI : 10.1109/TSG.2012.2225155.
- [53] Nadeem JAVAID et al. « Energy Efficient Integration of Renewable Energy Sources in the Smart Grid for Demand Side Management ». In : *IEEE Access* 6 (2018), p. 77077-77096. ISSN : 2169-3536. DOI : 10.1109/ACCESS.2018.2866461.

- [54] J. GARCÍA-VILLALOBOS et al. « Multi-Objective Optimization Control of Plug-in Electric Vehicles in Low Voltage Distribution Networks ». In : *Applied Energy* 180 (15 oct. 2016), p. 155-168. ISSN : 0306-2619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2016.07.110. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916310406> (visité le 08/07/2022).
- [55] Mohamed LOTFI et al. « Coordinating Energy Management Systems in Smart Cities with Electric Vehicles ». In : *Applied Energy* 307 (1^{er} fév. 2022), p. 118241. ISSN : 0306-2619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2021.118241. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192101504X> (visité le 08/07/2022).
- [56] Julian de HOOG et al. « Electric Vehicle Charging and Grid Constraints : Comparing Distributed and Centralized Approaches ». In : 21 juill. 2013. DOI : 10.1109/PESMG.2013.6672222.
- [57] Siyamak SARABI. « Contribution of Vehicle-to-Grid (V2G) to the Energy Management of the Electric Vehicles Fleet on the Distribution Network ». These de doctorat. Paris, ENSAM, 29 nov. 2016. URL : <https://www.theses.fr/2016ENAM0050> (visité le 09/09/2022).
- [58] Shirazul ISLAM et al. « State-of-the-Art Vehicle-to-Everything Mode of Operation of Electric Vehicles and Its Future Perspectives ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 166 (1^{er} sept. 2022), p. 112574. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2022.112574. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122004701> (visité le 27/07/2024).
- [59] Ali Esmael NEZHAD et al. « Centralized Operation of Multi-Energy Microgrids ». In : *2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). Juin 2023, p. 1-6. DOI : 10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194826. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10194826> (visité le 19/03/2024).
- [60] Zheyuan CHENG, Jie DUAN et Mo-Yuen CHOW. « To Centralize or to Distribute : That Is the Question : A Comparison of Advanced Microgrid Management Systems ». In : *IEEE Industrial Electronics Magazine* 12.1 (mars 2018), p. 6-24. ISSN : 1941-0115. DOI : 10.1109/MIE.2018.2789926. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8322317> (visité le 19/03/2024).

- [61] M. IQBAL et al. « Optimization Classification, Algorithms and Tools for Renewable Energy : A Review ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (1^{er} nov. 2014), p. 640-654. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2014.07.120. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114005723> (visité le 20/03/2024).
- [62] Afifa AKTER et al. « A Review on Microgrid Optimization with Meta-Heuristic Techniques : Scopes, Trends and Recommendation ». In : *Energy Strategy Reviews* 51 (1^{er} jan. 2024), p. 101298. ISSN : 2211-467X. DOI : 10.1016/j.esr.2024.101298. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X24000051> (visité le 20/03/2024).
- [63] Giorgos S. GEORGIU et al. « A Linear Programming Approach to the Optimal Utilization of Renewable Energy Sources in Buildings ». In : *2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Août 2017, p. 1-6. DOI : 10.1109/UPEC.2017.8231968. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8231968> (visité le 21/03/2024).
- [64] Ariq Kusuma WARDANA, SOEDIBYO et Vita Lystianingrum Budiharto PUTRI. « Optimization Control Strategy of Battery-Supercapacitor to Mitigate PV Power Fluctuation Using Dynamic Programming Algorithm ». In : *2022 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*. 2022 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA). Juill. 2022, p. 428-433. DOI : 10.1109/ISITIA56226.2022.9855298. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9855298> (visité le 21/03/2024).
- [65] *Ordinateur et Accès à Internet : Les Inégalités d'équipement Persistent Selon Le Niveau de Vie - Insee Focus - 226*. URL : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5057474#tableau-figure4> (visité le 21/03/2024).
- [66] *Comment agir contre l'illectronisme*. Gouvernement.fr. URL : <https://www.gouvernement.fr/actualite/comment-agir-contre-l-illectronisme> (visité le 08/09/2022).
- [67] *Numérique : quel impact environnemental?* ADEME Infos. URL : <https://infos.ademe.fr/magazine-avril-2022/faits-et-chiffres/numerique-quel-impact-environnemental/> (visité le 22/03/2024).
- [68] The Shift PROJECT. « Pour une sobriété numérique » : le nouveau rapport du Shift publié. The Shift Project. 4 oct. 2018. URL : <https://theshiftproject.org/article/pour-une-sobriete-numerique-rapport-shift/> (visité le 22/03/2024).

- [69] *Digitalization and Energy – Analysis*. IEA. URL : <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy> (visité le 22/03/2024).
- [70] Thomas BAUWENS et al. « Conceptualizing Community in Energy Systems : A Systematic Review of 183 Definitions ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 156 (1^{er} mars 2022), p. 111999. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2021.111999. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121012624> (visité le 22/12/2021).
- [71] Marta PAPPALARDO. « La gouvernance des communautés énergétiques, entre pratiques de l'espace et dynamiques de pouvoir ». In : *Espaces et sociétés* 182.1 (23 sept. 2021), p. 55-71. ISSN : 0014-0481. URL : <http://www.cairn.info/revue-espaces-et-societes-2021-1-page-55.htm> (visité le 15/12/2021).
- [72] Vladimir Z. GJORGIEVSKI, Snezana CUNDEVA et George E. GEORGHIOU. « Social Arrangements, Technical Designs and Impacts of Energy Communities : A Review ». In : *Renewable Energy* 169 (1^{er} mai 2021), p. 1138-1156. ISSN : 0960-1481. DOI : 10.1016/j.renene.2021.01.078. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121000859> (visité le 22/12/2021).
- [73] Vasco BRUMMER. « Community Energy – Benefits and Barriers : A Comparative Literature Review of Community Energy in the UK, Germany and the USA, the Benefits It Provides for Society and the Barriers It Faces ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94 (1^{er} oct. 2018), p. 187-196. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2018.06.013. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118304507> (visité le 22/12/2021).
- [74] Khadija PARVIN et al. « Fuzzy Based Particle Swarm Optimization for Modeling Home Appliances Towards Energy Saving and Cost Reduction Under Demand Response Consideration ». In : *IEEE Access* 8 (2020), p. 210784-210799. ISSN : 2169-3536. DOI : 10.1109/ACCESS.2020.3039965. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9268107> (visité le 05/04/2024).
- [75] A. AJITHA et al. « Design and Implementation of Smart Home Energy Management System for Indian Residential Sector ». In : *Energy Conversion and Management* 307 (1^{er} mai 2024), p. 118369. ISSN : 0196-8904. DOI : 10.1016/j.enconman.2024.118369. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890424003108> (visité le 05/04/2024).

- [76] Md Mamun UR RASHID et al. « An Improved Energy and Cost Minimization Scheme for Home Energy Management (HEM) in the Smart Grid Framework ». In : *2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*. 2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). Oct. 2020, p. 1-2. doi : 10.1109/ASEMD49065.2020.9276111. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9276111> (visité le 05/04/2024).
- [77] A. HAST, B. ALIMOHAMMADISAGVAND et S. SYRI. « Consumer Attitudes towards Renewable Energy in China—The Case of Shanghai ». In : *Sustainable Cities and Society* 17 (1^{er} sept. 2015), p. 69-79. ISSN : 2210-6707. doi : 10.1016/j.scs.2015.04.003. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670715000438> (visité le 05/04/2024).
- [78] Liridon KORCAJ, Ulf J. J. HAHNEL et Hans SPADA. « Intentions to Adopt Photovoltaic Systems Depend on Homeowners' Expected Personal Gains and Behavior of Peers ». In : *Renewable Energy* 75 (1^{er} mars 2015), p. 407-415. ISSN : 0960-1481. doi : 10.1016/j.renene.2014.10.007. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114006326> (visité le 05/04/2024).
- [79] Chien-fei CHEN et al. « When East Meets West : Understanding Residents' Home Energy Management System Adoption Intention and Willingness to Pay in Japan and the United States ». In : *Energy Research & Social Science* 69 (1^{er} nov. 2020), p. 101616. ISSN : 2214-6296. doi : 10.1016/j.erss.2020.101616. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629620301912> (visité le 05/04/2024).
- [80] Xiaojing Xu et Chien-fei CHEN. « Energy Efficiency and Energy Justice for U.S. Low-Income Households : An Analysis of Multifaceted Challenges and Potential ». In : *Energy Policy* 128 (1^{er} mai 2019), p. 763-774. ISSN : 0301-4215. doi : 10.1016/j.enpol.2019.01.020. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421519300205> (visité le 05/04/2024).
- [81] Jelena ZORIĆ et Nevenka HROVATIN. « Household Willingness to Pay for Green Electricity in Slovenia ». In : *Energy Policy* 47 (1^{er} août 2012), p. 180-187. ISSN : 0301-4215. doi : 10.1016/j.enpol.2012.04.055. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512003606> (visité le 05/04/2024).
- [82] Tiruwork AREGA et Tewodros TADESSE. « Household Willingness to Pay for Green Electricity in Urban and Peri-Urban Tigray, Northern Ethiopia : Determinants and Welfare Effects ». In : *Energy Policy* 100 (1^{er} jan. 2017),

- p. 292-300. ISSN : 0301-4215. DOI : 10.1016/j.enpol.2016.10.022. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516305675> (visité le 05/04/2024).
- [83] Simona BIGERNA et Paolo POLINORI. « Italian Households' Willingness to Pay for Green Electricity ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34 (1^{er} juin 2014), p. 110-121. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2014.03.002. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114001592> (visité le 05/04/2024).
- [84] Xiurui GUO et al. « Willingness to Pay for Renewable Electricity : A Contingent Valuation Study in Beijing, China ». In : *Energy Policy* 68 (1^{er} mai 2014), p. 340-347. ISSN : 0301-4215. DOI : 10.1016/j.enpol.2013.11.032. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513011397> (visité le 05/04/2024).
- [85] Alastair BROWN et al. « Understanding Domestic Consumer Attitude and Behaviour towards Energy : A Study on the Island of Ireland ». In : *Energy Policy* 181 (1^{er} oct. 2023), p. 113693. ISSN : 0301-4215. DOI : 10.1016/j.enpol.2023.113693. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421523002781> (visité le 09/04/2024).
- [86] Zakaria YAHIA et Anup PRADHAN. « Multi-Objective Optimization of Household Appliance Scheduling Problem Considering Consumer Preference and Peak Load Reduction ». In : *Sustainable Cities and Society* 55 (1^{er} avr. 2020), p. 102058. ISSN : 2210-6707. DOI : 10.1016/j.scs.2020.102058. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720300457> (visité le 09/04/2024).
- [87] Jacques COENEN-HUTHER. « Le type idéal comme instrument de la recherche sociologique ». In : *Revue française de sociologie* 44.3 (2003), p. 531-547. ISSN : 0035-2969. DOI : 10.3917/rfs.443.0531. URL : <https://www.cairn.info/revue-francaise-de-sociologie-1-2003-3-page-531.htm> (visité le 08/04/2024).
- [88] ACCENTURE. « Understanding Consumer Preferences in Energy Efficiency ». In : (2010).
- [89] David FRANKEL, Stefan HECK et Humayun TAI. *Using a Consumer-Segmentation Approach to Make Energy-Efficiency Gains in the Residential Market*. McKinsey & Company, nov. 2013.
- [90] Bernadette SÜTTERLIN, Thomas A. BRUNNER et Michael SIEGRIST. « Who Puts the Most Energy into Energy Conservation? A Segmentation of Energy Consumers Based on Energy-Related Behavioral Characteristics ». In : *Energy Policy*. Clean Cooking Fuels and Technologies in Developing

- Economies 39.12 (1^{er} déc. 2011), p. 8137-8152. ISSN : 0301-4215. DOI : 10.1016/j.enpol.2011.10.008. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511007920> (visité le 09/04/2024).
- [91] Sara GOLMARYAMI, Manuel Lopes NUNES et Paula FERREIRA. « The Role of Social Learning on Consumers' Willingness to Engage in Demand-Side Management : An Agent-Based Modelling Approach ». In : *Smart Energy* 14 (1^{er} mai 2024), p. 100138. ISSN : 2666-9552. DOI : 10.1016/j.segy.2024.100138. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266695522400008X> (visité le 09/04/2024).
- [92] A. J. Dinusha RATHNAYAKA et al. « A Methodology to Find Influential Prosumers in Prosumer Community Groups ». In : *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 10.1 (fév. 2014), p. 706-713. ISSN : 1941-0050. DOI : 10.1109/TII.2013.2257803.
- [93] Solange MARTIN et Albane GASPARD. « Les comportements, levier de la transition écologique? » In : *Futuribles* 419.4 (2017), p. 33-44. ISSN : 0337-307X. URL : <http://www.cairn.info/revue-futuribles-2017-4-page-33.htm?contenu=article> (visité le 20/01/2022).
- [94] Hiroki HONDO et Kenshi BABA. « Socio-Psychological Impacts of the Introduction of Energy Technologies : Change in Environmental Behavior of Households with Photovoltaic Systems ». In : *Applied Energy* 87.1 (1^{er} jan. 2010), p. 229-235. ISSN : 0306-2619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2009.05.009. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909002013> (visité le 21/11/2023).
- [95] Inga WITTENBERG et Ellen MATTHIES. « How Do PV Households Use Their PV System and How Is This Related to Their Energy Use? » In : *Renewable Energy* 122 (1^{er} juill. 2018), p. 291-300. ISSN : 0960-1481. DOI : 10.1016/j.renene.2018.01.091. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118301010> (visité le 21/11/2023).
- [96] Erdal AYDIN, Dirk BROUNEN et Ahmet ERGÜN. « The Rebound Effect of Solar Panel Adoption : Evidence from Dutch Households ». In : *Energy Economics* 120 (1^{er} avr. 2023), p. 106645. ISSN : 0140-9883. DOI : 10.1016/j.eneco.2023.106645. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988323001433> (visité le 22/11/2023).
- [97] Tim JACKSON. « Motivating Sustainable Consumption : A Review of Evidence on Consumer Behaviour and Behavioural Change ». In : *Sustainable Development Research Network* 15 (1^{er} jan. 2005).

- [98] Zhifeng Guo et al. « Residential Electricity Consumption Behavior : Influencing Factors, Related Theories and Intervention Strategies ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (1^{er} jan. 2018), p. 399-412. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2017.07.046. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117311164> (visité le 19/01/2022).
- [99] Fabio MORET et Pierre PINSON. « Energy Collectives : A Community and Fairness Based Approach to Future Electricity Markets ». In : *IEEE Transactions on Power Systems* 34.5 (sept. 2019), p. 3994-4004. ISSN : 1558-0679. DOI : 10.1109/TPWRS.2018.2808961.
- [100] Inês F. G. REIS et al. « Towards Inclusive Community-Based Energy Markets : A Multiagent Framework ». In : *Applied Energy* (11 nov. 2021), p. 118115. ISSN : 0306-2619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2021.118115. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921013945> (visité le 21/12/2021).
- [101] Lesia MITRIDATI, Jalal KAZEMPOUR et Pierre PINSON. « Design and Game-Theoretic Analysis of Community-Based Market Mechanisms in Heat and Electricity Systems ». In : *Omega* 99 (1^{er} mars 2021), p. 102177. ISSN : 0305-0483. DOI : 10.1016/j.omega.2019.102177. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048319305523> (visité le 21/12/2021).
- [102] Shichang CUI et al. « A New and Fair Peer-to-Peer Energy Sharing Framework for Energy Buildings ». In : *IEEE Transactions on Smart Grid* 11.5 (sept. 2020), p. 3817-3826. ISSN : 1949-3061. DOI : 10.1109/TSG.2020.2986337.
- [103] Shichang CUI, Yan-Wu WANG et Jiang-Wen XIAO. « Peer-to-Peer Energy Sharing Among Smart Energy Buildings by Distributed Transaction ». In : *IEEE Transactions on Smart Grid* 10.6 (nov. 2019), p. 6491-6501. ISSN : 1949-3061. DOI : 10.1109/TSG.2019.2906059.
- [104] Wayes TUSHAR et al. « Peer-to-Peer Trading in Electricity Networks : An Overview ». In : *IEEE Transactions on Smart Grid* 11.4 (juill. 2020), p. 3185-3200. ISSN : 1949-3061. DOI : 10.1109/TSG.2020.2969657.
- [105] Chao LONG et al. « Feasibility of Peer-to-Peer Energy Trading in Low Voltage Electrical Distribution Networks ». In : *Energy Procedia*. 8th International Conference on Applied Energy, ICAE2016, 8-11 October 2016, Beijing, China 105 (1^{er} mai 2017), p. 2227-2232. ISSN : 1876-6102. DOI : 10.1016/j.egypro.2017.03.632. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217306860> (visité le 11/04/2024).

- [106] Nian LIU et al. « Online Energy Sharing for Nanogrid Clusters : A Lyapunov Optimization Approach ». In : *IEEE Transactions on Smart Grid* 9.5 (sept. 2018), p. 4624-4636. ISSN : 1949-3061. DOI : 10.1109/TSG.2017.2665634. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7845698> (visité le 11/04/2024).
- [107] Tiago SOUSA et al. « Peer-to-Peer and Community-Based Markets : A Comprehensive Review ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 104 (1^{er} avr. 2019), p. 367-378. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2019.01.036. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119300462> (visité le 11/04/2024).
- [108] Walid SAAD et al. « Game-Theoretic Methods for the Smart Grid : An Overview of Microgrid Systems, Demand-Side Management, and Smart Grid Communications ». In : *IEEE Signal Processing Magazine* 29.5 (sept. 2012), p. 86-105. ISSN : 1558-0792. DOI : 10.1109/MSP.2012.2186410.
- [109] Xin DONG, Xianshan LI et Shan CHENG. « Energy Management Optimization of Microgrid Cluster Based on Multi-Agent-System and Hierarchical Stackelberg Game Theory ». In : *IEEE Access* 8 (2020), p. 206183-206197. ISSN : 2169-3536. DOI : 10.1109/ACCESS.2020.3037676.
- [110] Nayara AGUIAR, Anamika DUBEY et Vijay GUPTA. « Network-Constrained Stackelberg Game for Pricing Demand Flexibility in Power Distribution Systems ». In : *IEEE Transactions on Smart Grid* 12.5 (sept. 2021), p. 4049-4058. ISSN : 1949-3061. DOI : 10.1109/TSG.2021.3078905.
- [111] Slim BELHAIZA et Uthman BAROUDI. « A Game Theoretic Model for Smart Grids Demand Management ». In : *IEEE Transactions on Smart Grid* 6.3 (mai 2015), p. 1386-1393. ISSN : 1949-3061. DOI : 10.1109/TSG.2014.2376632.
- [112] Andrey CHURKIN et al. « Review of Cooperative Game Theory Applications in Power System Expansion Planning ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 145 (1^{er} juill. 2021), p. 111056. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2021.111056. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121003452> (visité le 01/03/2022).
- [113] Behzad JAVANMARD et al. « Energy Management of Multi-Microgrids Based on Game Theory Approach in the Presence of Demand Response Programs, Energy Storage Systems and Renewable Energy Resources ». In : *Journal of Energy Storage* 42 (1^{er} oct. 2021), p. 102971. ISSN : 2352-152X. DOI : 10.1016/j.est.2021.102971. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X2100685X> (visité le 03/03/2022).

- [114] Sweta MALIK et al. « A Priority-Based Approach for Peer-to-Peer Energy Trading Using Cooperative Game Theory in Local Energy Community ». In : *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 137 (1^{er} mai 2022), p. 107865. ISSN : 0142-0615. DOI : 10.1016/j.ijepes.2021.107865. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521010796> (visité le 01/03/2022).
- [115] Adriana CHIȘ et Visa KOIVUNEN. « Coalitional Game-Based Cost Optimization of Energy Portfolio in Smart Grid Communities ». In : *IEEE Transactions on Smart Grid* 10.2 (mars 2019), p. 1960-1970. ISSN : 1949-3061. DOI : 10.1109/TSG.2017.2784902.
- [116] Batchu RAJASEKHAR et al. « Collaborative Energy Management for a Residential Community : A Non-Cooperative and Evolutionary Approach ». In : *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence* 3.3 (juin 2019), p. 177-192. ISSN : 2471-285X. DOI : 10.1109/TETCI.2018.2865223.
- [117] Liyang HAN, Thomas MORSTYN et Malcolm D. McCULLOCH. « Scaling Up Cooperative Game Theory-Based Energy Management Using Prosumer Clustering ». In : *IEEE Transactions on Smart Grid* 12.1 (jan. 2021), p. 289-300. ISSN : 1949-3061. DOI : 10.1109/TSG.2020.3015088.
- [118] Janet RANGANATHAN. « GHG Protocol Initiative Team ». In : ().
- [119] *éCO2mix - Toutes les données de l'électricité en temps réel*. URL : <https://www.rte-france.com/eco2mix> (visité le 15/07/2022).
- [120] *Documentation Base Carbone*. URL : https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?renouvelable.htm (visité le 15/07/2022).
- [121] Mehdi AZADI et al. « Transparency on Greenhouse Gas Emissions from Mining to Enable Climate Change Mitigation ». In : *Nature Geoscience* 13.2 (2 fév. 2020), p. 100-104. ISSN : 1752-0908. DOI : 10.1038/s41561-020-0531-3. URL : <https://www.nature.com/articles/s41561-020-0531-3> (visité le 14/09/2023).
- [122] RTE, *France's Transmission System Operator*. 24 juin 2022. URL : <http://www.rte-france.com/en/home> (visité le 21/09/2023).
- [123] *Reports - Fluxes, Not Stocks : The Real Challenges of Metallic Resources for the Energy Transition*. URL : <https://www.zenonresearch.org/insights/fluxes-not-stocks-the-real-challenges-of-metallic-resources-for-the-energy-transition> (visité le 13/09/2023).

- [124] Flávio Fonseca do CARMO et al. « Fundão Tailings Dam Failures : The Environment Tragedy of the Largest Technological Disaster of Brazilian Mining in Global Context ». In : *Perspectives in Ecology and Conservation* 15.3 (1^{er} juill. 2017), p. 145-151. ISSN : 2530-0644. DOI : 10.1016/j.pecon.2017.06.002. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1679007316301566> (visité le 20/09/2023).
- [125] Will STEFFEN et al. « Planetary Boundaries : Guiding Human Development on a Changing Planet ». In : *Science* 347.6223 (6223 13 fév. 2015), p. 1259855. DOI : 10.1126/science.1259855. URL : <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1259855> (visité le 19/05/2023).
- [126] Laura J. SONTER et al. « Renewable Energy Production Will Exacerbate Mining Threats to Biodiversity ». In : *Nature Communications* 11.1 (1^{er} sept. 2020), p. 4174. ISSN : 2041-1723. DOI : 10.1038/s41467-020-17928-5. URL : <https://www.nature.com/articles/s41467-020-17928-5> (visité le 19/05/2023).
- [127] Katherine RICHARDSON et al. « Earth beyond Six of Nine Planetary Boundaries ». In : *Science Advances* 9.37 (13 sept. 2023), eadh2458. DOI : 10.1126/sciadv.adh2458. URL : <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adh2458> (visité le 14/09/2023).
- [128] Friedrich B. JASPER et al. « Life Cycle Assessment (LCA) of a Battery Home Storage System Based on Primary Data ». In : *Journal of Cleaner Production* 366 (15 sept. 2022), p. 132899. ISSN : 0959-6526. DOI : 10.1016/j.jclepro.2022.132899. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622024921> (visité le 15/04/2024).
- [129] Manolis SOULIOTIS et al. « Experimental Study and Life Cycle Assessment (LCA) of Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) Solar Systems for Domestic Applications ». In : *Renewable Energy* 126 (1^{er} oct. 2018), p. 708-723. ISSN : 0960-1481. DOI : 10.1016/j.renene.2018.04.011. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811830418X> (visité le 15/04/2024).
- [130] Quanwei CHEN et al. « A Critical Comparison of LCA Calculation Models for the Power Lithium-Ion Battery in Electric Vehicles during Use-Phase ». In : *Energy* 296 (1^{er} juin 2024), p. 131175. ISSN : 0360-5442. DOI : 10.1016/j.energy.2024.131175. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544224009484> (visité le 15/04/2024).
- [131] Hans-Kristian RINGKJØB, Peter M. HAUGAN et Ida Marie SOLBREKKE. « A Review of Modelling Tools for Energy and Electricity Systems with Large Shares of Variable Renewables ». In : *Renewable and Sustainable Energy*

- Reviews* 96 (1^{er} nov. 2018), p. 440-459. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2018.08.002. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118305690> (visité le 07/12/2021).
- [132] P. BALAKUMAR, T. VINOPRABA et K. CHANDRASEKARAN. « Deep Learning Based Real Time Demand Side Management Controller for Smart Building Integrated with Renewable Energy and Energy Storage System ». In : *Journal of Energy Storage* 58 (1^{er} fév. 2023), p. 106412. ISSN : 2352-152X. DOI : 10.1016/j.est.2022.106412. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X2202401X> (visité le 17/04/2024).
- [133] B. LOKESHGUPTA et K. RAVIVARMA. « Coordinated Smart Home Energy Sharing with a Centralized Neighbourhood Energy Management ». In : *Sustainable Cities and Society* 96 (1^{er} sept. 2023), p. 104642. ISSN : 2210-6707. DOI : 10.1016/j.scs.2023.104642. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670723002536> (visité le 17/04/2024).
- [134] Peter Anuoluwapo GBADEGA et Yanxia SUN. « Centralized Peer-to-Peer Transactive Energy Market Approach in a Prosumer-Centric Residential Smart Grid Environment ». In : *Energy Reports*. 2022 The 5th International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering 8 (1^{er} nov. 2022), p. 105-116. ISSN : 2352-4847. DOI : 10.1016/j.egyrs.2022.10.080. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722020170> (visité le 17/04/2024).
- [135] Muhammad Amir RAZA et al. « Challenges and Potentials of Implementing a Smart Grid for Pakistan's Electric Network ». In : *Energy Strategy Reviews* 43 (1^{er} sept. 2022), p. 100941. ISSN : 2211-467X. DOI : 10.1016/j.esr.2022.100941. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X22001353> (visité le 17/04/2024).
- [136] Sajjad ALI et al. « Solving Day-Ahead Scheduling Problem with Multi-Objective Energy Optimization for Demand Side Management in Smart Grid ». In : *Engineering Science and Technology, an International Journal* 36 (1^{er} déc. 2022), p. 101135. ISSN : 2215-0986. DOI : 10.1016/j.jestech.2022.101135. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221509862200043X> (visité le 17/04/2024).
- [137] M. KILLIAN, M. ZAUNER et M. KOZEK. « Comprehensive Smart Home Energy Management System Using Mixed-Integer Quadratic-Programming ». In : *Applied Energy* 222 (15 juill. 2018), p. 662-672. ISSN : 0306-2619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2018.03.179. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918305282> (visité le 18/04/2024).

- [138] Christos D. KORKAS et al. « Nearly Optimal Demand Side Management for Energy, Thermal, EV and Storage Loads : An Approximate Dynamic Programming Approach for Smarter Buildings ». In : *Energy and Buildings* 255 (15 jan. 2022), p. 111676. ISSN : 0378-7788. DOI : 10.1016/j.enbuild.2021.111676. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821009609> (visité le 17/04/2024).
- [139] Benoit DURILLON et al. « Decentralized Neighbourhood Energy Management Considering Residential Profiles and Welfare for Grid Load Smoothing ». In : *Sustainable Cities and Society* 63 (1^{er} déc. 2020), p. 102464. ISSN : 2210-6707. DOI : 10.1016/j.scs.2020.102464. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720306843> (visité le 17/04/2024).
- [140] Shreenidhi H.s. et Narayana Swamy RAMAIAH. « A Two-Stage Deep Convolutional Model for Demand Response Energy Management System in IoT-enabled Smart Grid ». In : *Sustainable Energy, Grids and Networks* 30 (1^{er} juin 2022), p. 100630. ISSN : 2352-4677. DOI : 10.1016/j.segan.2022.100630. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352467722000169> (visité le 17/04/2024).
- [141] Pradnya JADHAV, Dagadu MORE et Surender Reddy SALKUTI. « Smart Residential Distribution Energy Management System with Integration of Demand Response and Aggregator ». In : *Cleaner and Responsible Consumption* 9 (1^{er} juin 2023), p. 100115. ISSN : 2666-7843. DOI : 10.1016/j.clrc.2023.100115. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666784323000165> (visité le 17/04/2024).
- [142] Abdulaziz H. ALGHTANI, Vineet TIRTH et Ali ALGAHTANI. « Lens-Oppositional Duck Pack Algorithm Based Smart Home Energy Management System for Demand Response in Smart Grids ». In : *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 56 (1^{er} mars 2023), p. 103112. ISSN : 2213-1388. DOI : 10.1016/j.seta.2023.103112. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138823001054> (visité le 17/04/2024).
- [143] Seyedeh Samaneh GHAZIMIRSAEID et al. « Multi-Agent-Based Energy Management of Multiple Grid-Connected Green Buildings ». In : *Journal of Building Engineering* 74 (1^{er} sept. 2023), p. 106866. ISSN : 2352-7102. DOI : 10.1016/j.jobbe.2023.106866. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223010458> (visité le 17/04/2024).
- [144] Mattia PASQUI et al. « A New Smart Batteries Management for Renewable Energy Communities ». In : *Sustainable Energy, Grids and Networks* 34 (1^{er} juin 2023), p. 101043. ISSN : 2352-4677. DOI : 10.1016/j.segan.2023.

101043. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352467723000516> (visité le 17/04/2024).
- [145] Sara BARJA-MARTINEZ et al. « A Novel Hybrid Home Energy Management System Considering Electricity Cost and Greenhouse Gas Emissions Minimization ». In : *IEEE Transactions on Industry Applications* 57.3 (mai 2021), p. 2782-2790. ISSN : 1939-9367. DOI : 10.1109/TIA.2021.3057014. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9346054> (visité le 17/04/2024).
- [146] Kalim ULLAH et al. « A Multi-Objective Energy Optimization in Smart Grid with High Penetration of Renewable Energy Sources ». In : *Applied Energy* 299 (1^{er} oct. 2021), p. 117104. ISSN : 0306-2619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2021.117104. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921005481> (visité le 18/04/2024).
- [147] Yuzhou TANG et al. « Reducing the Life Cycle Environmental Impact of Electric Vehicles through Emissions-Responsive Charging ». In : *iScience* 24.12 (17 déc. 2021), p. 103499. ISSN : 2589-0042. DOI : 10.1016/j.isci.2021.103499. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S258900422101470X> (visité le 18/04/2024).
- [148] Jean-Nicolas LOUIS et Eva PONGRÁCZ. « Life Cycle Impact Assessment of Home Energy Management Systems (HEMS) Using Dynamic Emissions Factors for Electricity in Finland ». In : *Environmental Impact Assessment Review* 67 (1^{er} nov. 2017), p. 109-116. ISSN : 0195-9255. DOI : 10.1016/j.eiar.2017.08.009. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925516304048> (visité le 18/04/2024).
- [149] Amir SAFAEI, Fausto FREIRE et Carlos Henggeler ANTUNES. « A Life-Cycle Cost Optimization Model with Environmental Impact Assessment for Energy Management of Service Buildings ». In : *2012 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)*. 2012 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST). Mai 2012, p. 1-6. DOI : 10.1109/ISSST.2012.6227981. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/6227981> (visité le 18/04/2024).
- [150] Marios D. CHATZISIDERIS et al. « Environmental Impacts of Electricity Self-Consumption from Organic Photovoltaic Battery Systems at Industrial Facilities in Denmark ». In : *CIRP Annals* 66.1 (1^{er} jan. 2017), p. 45-48. ISSN : 0007-8506. DOI : 10.1016/j.cirp.2017.04.100. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850617301002> (visité le 18/04/2024).

- [151] A. MÉRIDA GARCÍA et al. « Comparing the Environmental and Economic Impacts of On- or off-Grid Solar Photovoltaics with Traditional Energy Sources for Rural Irrigation Systems ». In : *Renewable Energy* 140 (1^{er} sept. 2019), p. 895-904. ISSN : 0960-1481. DOI : 10.1016/j.renene.2019.03.122. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119304343> (visité le 18/04/2024).
- [152] S. S. van DAM, C. A. BAKKER et J. C. BUITER. « Do Home Energy Management Systems Make Sense? Assessing Their Overall Lifecycle Impact ». In : *Energy Policy* 63 (1^{er} déc. 2013), p. 398-407. ISSN : 0301-4215. DOI : 10.1016/j.enpol.2013.09.041. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513009658> (visité le 18/04/2024).
- [153] S. DENG, R. Z. WANG et Y. J. DAI. « How to Evaluate Performance of Net Zero Energy Building – A Literature Research ». In : *Energy* 71 (15 juill. 2014), p. 1-16. ISSN : 0360-5442. DOI : 10.1016/j.energy.2014.05.007. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214005568> (visité le 18/04/2024).
- [154] M. MORETTI et al. « A Systematic Review of Environmental and Economic Impacts of Smart Grids ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68 (1^{er} fév. 2017), p. 888-898. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2016.03.039. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116002744> (visité le 18/04/2024).
- [155] *CREST Demand Model*. Loughborough University, 16 sept. 2015. DOI : 10.17028/rd.lboro.2001129.v8. URL : https://figshare.com/articles/dataset/CREST_Demand_Model_v2_0/2001129/8 (visité le 15/07/2022).
- [156] *L'équipement Des Ménages de 1996 à 2019 – Équipement Des Ménages 1996 - 2019 — Insee*. URL : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5017395?sommaire=5017397#consulter> (visité le 15/07/2022).
- [157] *Taille et Composition Des Ménages – La France et Ses Territoires — Insee*. URL : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5039855?sommaire=5040030> (visité le 30/04/2024).
- [158] Youness HAKAM, Ahmed GAGA et Benachir ELHADADI. « Exploring the State of Electric Vehicles : An Evidence-Based Examination of Current and Future Electric Vehicle Technologies and Smart Charging Stations ». In : *Energy Reports* 11 (1^{er} juin 2024), p. 4102-4114. ISSN : 2352-4847. DOI : 10.1016/j.egy.2024.04.002. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484724002075> (visité le 02/05/2024).

- [159] Isha CHANDRA, Navneet Kumar SINGH et Paulson SAMUEL. « A Comprehensive Review on Coordinated Charging of Electric Vehicles in Distribution Networks ». In : *Journal of Energy Storage* 89 (1^{er} juin 2024), p. 111659. ISSN : 2352-152X. DOI : 10.1016/j.est.2024.111659. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X24012441> (visité le 02/05/2024).
- [160] Nilgun FESCIOGLU-UNVER et Melike YILDIZ AKTAŞ. « Electric Vehicle Charging Service Operations : A Review of Machine Learning Applications for Infrastructure Planning, Control, Pricing and Routing ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 188 (1^{er} déc. 2023), p. 113873. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2023.113873. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123007311> (visité le 02/05/2024).
- [161] Nicolò DAINA, Aruna SIVAKUMAR et John W. POLAK. « Electric Vehicle Charging Choices : Modelling and Implications for Smart Charging Services ». In : *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 81 (1^{er} août 2017), p. 36-56. ISSN : 0968-090X. DOI : 10.1016/j.trc.2017.05.006. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X17301365> (visité le 02/05/2024).
- [162] Yue WANG, Enjian YAO et Long PAN. « Electric Vehicle Drivers' Charging Behavior Analysis Considering Heterogeneity and Satisfaction ». In : *Journal of Cleaner Production* 286 (1^{er} mars 2021), p. 124982. ISSN : 0959-6526. DOI : 10.1016/j.jclepro.2020.124982. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620350265> (visité le 02/05/2024).
- [163] Qiang XING et al. « Modelling Driving and Charging Behaviours of Electric Vehicles Using a Data-Driven Approach Combined with Behavioural Economics Theory ». In : *Journal of Cleaner Production* 324 (15 nov. 2021), p. 129243. ISSN : 0959-6526. DOI : 10.1016/j.jclepro.2021.129243. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621034296> (visité le 02/05/2024).
- [164] *Chiffres des ventes & immatriculations de voitures électriques en France*. Automobile Propre. URL : <https://www.automobile-propre.com/dossiers/chiffres-vente-immatriculations-france/> (visité le 08/11/2021).
- [165] Claire GABERT. « Le baromètre de la mobilité électrique ». In : ().
- [166] *HelioClim-3 Real Time and Forecast*. SoDa. URL : <https://www.soda-pro.com> (visité le 03/05/2024).

- [167] *Solcast - Solar Forecasting & Solar Irradiance Data*. Solcast. URL : <https://solcast.com/> (visité le 15/07/2022).
- [168] *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission*. URL : https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/ (visité le 03/05/2024).
- [169] *PVsyst – Logiciel Photovoltaïque*. URL : <https://www.pvsyst.com/fr/> (visité le 03/05/2024).
- [170] *PV*SOL Online - a Free Tool for Solar Power (PV) Systems*. URL : <https://pvsol-online.valentin-software.com/> (visité le 03/05/2024).
- [171] In s F. G. REIS et al. « Collective Self-Consumption in Multi-Tenancy Buildings–To What Extent Do Consumers’ Goals Influence the Energy System’s Performance? » In : *Sustainable Cities and Society* 80 (1^{er} mai 2022), p. 103688. ISSN : 2210-6707. DOI : 10.1016/j.scs.2022.103688. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670722000221> (visité le 06/05/2024).
- [172] Anthony AOUAD, Khaled ALMAKSOUR et Dhaker ABBES. « Storage Management Optimization Based on Electrical Consumption and Production Forecast in a Photovoltaic System ». In : *Mathematics and Computers in Simulation* (18 oct. 2023). ISSN : 0378-4754. DOI : 10.1016/j.matcom.2023.10.007. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378475423004391> (visité le 03/05/2024).
- [173] Simona-Vasilica OPREA et Adela B RA. « A Stacked Ensemble Forecast for Photovoltaic Power Plants Combining Deterministic and Stochastic Methods ». In : *Applied Soft Computing* 147 (1^{er} nov. 2023), p. 110781. ISSN : 1568-4946. DOI : 10.1016/j.asoc.2023.110781. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494623007998> (visité le 03/05/2024).
- [174] Florian BARBIERI, Sumedha RAJAKARUNA et Arindam GHOSH. « Very Short-Term Photovoltaic Power Forecasting with Cloud Modeling : A Review ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75 (1^{er} ao t 2017), p. 242-263. ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2016.10.068. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211630733X> (visité le 03/05/2024).
- [175] William F. HOLMGREN, Clifford W. HANSEN et Mark A. MIKOFSKI. « Pvlib Python : A Python Package for Modeling Solar Energy Systems ». In : *Journal of Open Source Software* 3.29 (7 sept. 2018), p. 884. ISSN : 2475-9066. DOI : 10.21105/joss.00884. URL : <http://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.00884> (visité le 15/07/2022).

- [176] Yiling LUO, Yan GAO et Deli FAN. « Real-Time Demand Response Strategy Base on Price and Incentive Considering Multi-Energy in Smart Grid : A Bi-Level Optimization Method ». In : *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 153 (1^{er} nov. 2023), p. 109354. ISSN : 0142-0615. DOI : 10.1016/j.ijepes.2023.109354. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061523004118> (visité le 14/05/2024).
- [177] *Agile Pricing Explained*. Octopus Energy. URL : <https://octopus.energy/blog/agile-pricing-explained/> (visité le 24/11/2022).
- [178] Red ELÉCTRICA. *Voluntary Price for the Small Consumer (PVPC)*. Red Eléctrica. URL : <https://www.ree.es/en/activities/operation-of-the-electricity-systemvoluntary-price-small-consumer-pvpc> (visité le 14/05/2024).
- [179] *Photovoltaic Economics - LCoE*. URL : <https://www.pvresources.com/en/economics/lcoe.php> (visité le 05/04/2022).
- [180] *Photovoltaïque.Info - Connaître Les Coûts et Évaluer La Rentabilité*. URL : <https://www.photovoltaïque.info/fr/preparer-un-projet/quelles-demarches-realiser/choisir-son-modele-economique/> (visité le 14/05/2024).
- [181] *L'énergie Solaire Photovoltaïque : L'électricité Solaire*. Solaire en Nord. URL : <https://solaire-en-nord.fr/lenergie-solaire-photovoltaïque/> (visité le 14/05/2024).
- [182] *Understanding the Public Transmission System Access Tariff (TURPE) - RTE Services Portal*. Portail Services RTE. URL : <https://www.services-rte.com/en/learn-more-about-our-services/understanding-the-public-transmission-system-access-tariff-turpe.html> (visité le 22/08/2023).
- [183] 14:00-17:00. *ISO 14040:2006*. ISO. URL : <https://www.iso.org/fr/standard/37456.html> (visité le 04/09/2024).
- [184] 14:00-17:00. *ISO 14044:2006*. ISO. URL : <https://www.iso.org/fr/standard/38498.html> (visité le 04/09/2024).
- [185] Hauschild M et al. *Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context - Based on Existing Environmental Impact Assessment Models and Factors (International Reference Life Cycle Data System - ILCD Handbook)*. Scientific analysis or review, Technical guidance LB-NA-24571-EN-C. Luxembourg (Luxembourg) : Publications Office of the European Union, 2011. DOI : 10.2788/33030. URL : <https://ep1ca.jrc.ec.europa.eu/>.

- [186] Serenella SALA, Alessandro CERUTTI et Rana PANT. *Development of a Weighting Approach for the Environmental Footprint*. JRC Publications Repository. 19 avr. 2018. DOI : 10.2760/945290. URL : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC106545> (visité le 17/05/2024).
- [187] *Base Empreinte®*. URL : <https://base-empreinte.ademe.fr/> (visité le 17/05/2024).
- [188] Gregor WERNET et al. « The Ecoinvent Database Version 3 (Part I) : Overview and Methodology ». In : *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21.9 (1^{er} sept. 2016), p. 1218-1230. ISSN : 1614-7502. DOI : 10.1007/s11367-016-1087-8. URL : <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>.
- [189] Serenella SALA, Marc-Andree WOLF et Rana PANT. *Characterisation Factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment Methods. Database and Supporting Information*. 1^{er} jan. 2012. DOI : 10.2788/60825.
- [190] 'Production – Thermique Fossile : RTE Bilan Électrique 2021'. URL : https://bilan-electrique-2021.rte-france.com/production_thermique_fossile/# (visité le 06/01/2023).
- [191] *Évolution du parc éolien en France*. URL : <https://datawrapper.dwcdn.net/RgIn6/5/> (visité le 17/05/2024).
- [192] 'Production – Hydraulique : : RTE Bilan Électrique 2021'. URL : https://bilan-electrique-2021.rte-france.com/production_hydraulique/# (visité le 06/01/2023).
- [193] NICKLAUS DORIS et al. *Le photovoltaïque : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles*. Ministère de la transition écologique, 2020. 111 p. URL : <https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/788680/le-photovoltaïque-choix-technologiques-enjeux-matieres-et-opportunités-industrielles> (visité le 20/05/2024).
- [194] Johanna POHL et al. « Environmental Saving Potentials of a Smart Home System from a Life Cycle Perspective : How Green Is the Smart Home ? » In : *Journal of Cleaner Production* 312 (20 août 2021), p. 127845. ISSN : 0959-6526. DOI : 10.1016/j.jclepro.2021.127845. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621020631> (visité le 17/04/2024).

- [195] Jean-Nicolas Louis et al. « Environmental Impacts and Benefits of Smart Home Automation : Life Cycle Assessment of Home Energy Management System ». In : *IFAC-PapersOnLine*. 8th Vienna International Conference on Mathematical Modelling 48.1 (1^{er} jan. 2015), p. 880-885. ISSN : 2405-8963. DOI : 10.1016/j.ifacol.2015.05.158. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315001597> (visité le 22/05/2024).
- [196] *Le marché de l'électricité — Enedis*. URL : <https://www.enedis.fr/nous-connaître/le-marche-de-lelectricite> (visité le 22/05/2024).
- [197] *Le compteur Linky, l'allié d'une consommation responsable — Enedis*. URL : <https://www.enedis.fr/reussir-la-transition-ecologique/encourager-une-consommation-responsable> (visité le 22/05/2024).
- [198] *Enquête Performance de l'Habitat, Équipements, Besoins et Usages de l'énergie (Phébus) — Données et Études Statistiques*. URL : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-performance-de-lhabitat-equipements-besoins-et-usages-de-lenergie-phebus> (visité le 18/08/2023).
- [199] J. KENNEDY et R. EBERHART. « Particle Swarm Optimization ». In : *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. T. 4. Nov. 1995, 1942-1948 vol.4. DOI : 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [200] *Introduction — PySwarms 1.3.0 Documentation*. URL : <https://pyswarms.readthedocs.io/en/latest/intro.html> (visité le 27/10/2023).
- [201] Chunlin LUO, Xiaoyang ZHOU et Benjamin LEV. « Core, Shapley Value, Nucleolus and Nash Bargaining Solution : A Survey of Recent Developments and Applications in Operations Management ». In : *Omega* 110 (1^{er} juill. 2022), p. 102638. ISSN : 0305-0483. DOI : 10.1016/j.omega.2022.102638. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048322000469> (visité le 30/10/2023).
- [202] Elena IÑARRA, Roberto SERRANO et Ken-Ichi SHIMOMURA. « The Nucleolus, the Kernel, and the Bargaining Set : An Update ». In : *Revue économique* 71.2 (28 fév. 2020), p. 225-266. ISSN : 0035-2764. URL : <https://www.cairn.info/revue-economique-2020-2-page-225.htm?ref=doi> (visité le 04/01/2023).
- [203] L. S. SHAPLEY. « 17. A Value for n-Person Games ». In : *Contributions to the Theory of Games (AM-28), Volume II*. Sous la dir. d'Harold William KUHN et Albert William TUCKER. Princeton : Princeton University Press, 1953, p. 307-318. ISBN : 978-1-4008-8197-0. DOI : doi : 10.1515/9781400881970-

018. URL : <https://doi.org/10.1515/9781400881970-018> (visité le 15/07/2024).
- [204] Xi LUO et al. « Optimal Design and Cost Allocation of a Distributed Energy Resource (DER) System with District Energy Networks : A Case Study of an Isolated Island in the South China Sea ». In : *Sustainable Cities and Society* 51 (1^{er} nov. 2019), p. 101726. ISSN : 2210-6707. DOI : 10.1016/j.scs.2019.101726. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670719302884> (visité le 02/07/2024).
- [205] Jie MEI et al. « Coalitional Game Theory Based Local Power Exchange Algorithm for Networked Microgrids ». In : *Applied Energy* 239 (1^{er} avr. 2019), p. 133-141. ISSN : 0306-2619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2019.01.208. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919302296> (visité le 03/07/2024).
- [206] Luis GOMES et Zita VALE. « Costless Renewable Energy Distribution Model Based on Cooperative Game Theory for Energy Communities Considering Its Members' Active Contributions ». In : *Sustainable Cities and Society* 101 (1^{er} fév. 2024), p. 105060. ISSN : 2210-6707. DOI : 10.1016/j.scs.2023.105060. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670723006704> (visité le 26/03/2024).
- [207] Adia KHALID et Nadeem JAVAID. « Coalition Based Game Theoretic Energy Management System of a Building As-Service-over Fog ». In : *Sustainable Cities and Society* 48 (1^{er} juill. 2019), p. 101509. ISSN : 2210-6707. DOI : 10.1016/j.scs.2019.101509. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670718304402> (visité le 26/03/2024).
- [208] David SCHMEIDLER. « The Nucleolus of a Characteristic Function Game ». In : *SIAM Journal on Applied Mathematics* 17.6 (nov. 1969), p. 1163-1170. ISSN : 0036-1399. DOI : 10.1137/0117107. URL : <https://epubs.siam.org/doi/10.1137/0117107> (visité le 15/07/2024).
- [209] Liyang HAN, Thomas MORSTYN et Malcolm McCULLOCH. « Incentivizing Prosumer Coalitions With Energy Management Using Cooperative Game Theory ». In : *IEEE Transactions on Power Systems* 34.1 (jan. 2019), p. 303-313. ISSN : 1558-0679. DOI : 10.1109/TPWRS.2018.2858540.
- [210] Changsen FENG et al. « Coalitional Game-Based Transactive Energy Management in Local Energy Communities ». In : *IEEE Transactions on Power Systems* 35.3 (mai 2020), p. 1729-1740. ISSN : 1558-0679. DOI : 10.1109/TPWRS.2019.2957537.

- [211] Justo PUERTO et Federico PEREA. « Finding the Nucleolus of Any N-Person Cooperative Game by a Single Linear Program ». In : *Computers & Operations Research* 40.10 (1^{er} oct. 2013), p. 2308-2313. ISSN : 0305-0548. DOI : 10.1016/j.cor.2013.03.011. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054813000877> (visité le 12/01/2023).
- [212] Adrien BOSSU et al. « Coalitional Game-Based Gain Generation and Distribution for Collective Self-Consumption in an Energy Community ». In : *Mathematics and Computers in Simulation* 225 (1^{er} nov. 2024), p. 129-147. ISSN : 0378-4754. DOI : 10.1016/j.matcom.2024.04.012. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378475424001381> (visité le 15/07/2024).
- [213] Yan DU et al. « A Cooperative Game Approach for Coordinating Multi-Microgrid Operation within Distribution Systems ». In : *Applied Energy* 222 (15 juill. 2018), p. 383-395. ISSN : 0306-2619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2018.03.086. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918304240> (visité le 03/07/2024).
- [214] Martin HUPEZ et al. « A New Cooperative Framework for a Fair and Cost-Optimal Allocation of Resources Within a Low Voltage Electricity Community ». In : *IEEE Transactions on Smart Grid* 12.3 (mai 2021), p. 2201-2211. ISSN : 1949-3061. DOI : 10.1109/TSG.2020.3040086.
- [215] Wenqi CAI, Arash Bahari KORDABAD et Sébastien GROS. « Energy Management in Residential Microgrid Using Model Predictive Control-Based Reinforcement Learning and Shapley Value ». In : *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 119 (1^{er} mars 2023), p. 105793. ISSN : 0952-1976. DOI : 10.1016/j.engappai.2022.105793. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197622007837> (visité le 23/04/2024).
- [216] Wei HU et al. « A Cooperative Game Based Fair-Efficient Trading Model in Global Green Energy Market ». In : *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Nov. 2019, p. 672-676. DOI : 10.1109/EI247390.2019.9061736. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9061736> (visité le 23/04/2024).
- [217] Marius BARANAUSKAS et al. « Value Creation and Sharing Methods in Household Energy Communities ». In : *2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE)*. 2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE). Jan. 2022, p. 1-8. DOI : 10.1109/

- PESGRE52268.2022.9715888. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9715888> (visité le 23/04/2024).
- [218] Tianhan ZHANG et al. « Shared Energy Storage-Assisted and Tolerance-Based Alliance Strategy for Wind Power Generators Based on Cooperative Game and Resource Dependence Theories ». In : *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 155 (1^{er} jan. 2024), p. 109605. ISSN : 0142-0615. DOI : 10.1016/j.ijepes.2023.109605. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061523006622> (visité le 02/07/2024).
- [219] Xi Luo et Yanfeng LIU. « A Multiple-Coalition-Based Energy Trading Scheme of Hierarchical Integrated Energy Systems ». In : *Sustainable Cities and Society* 64 (1^{er} jan. 2021), p. 102518. ISSN : 2210-6707. DOI : 10.1016/j.scs.2020.102518. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720307356> (visité le 02/07/2024).
- [220] Bilal Naji ALHASNAWI et al. « Consensus Algorithm-based Coalition Game Theory for Demand Management Scheme in Smart Microgrid ». In : *Sustainable Cities and Society* 74 (1^{er} nov. 2021), p. 103248. ISSN : 2210-6707. DOI : 10.1016/j.scs.2021.103248. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670721005254> (visité le 02/07/2024).
- [221] Lucas FREIRE et al. « A Hybrid MILP and Benders Decomposition Approach to Find the Nucleolus Quota Allocation for a Renewable Energy Portfolio ». In : *IEEE Transactions on Power Systems* 30.6 (nov. 2015), p. 3265-3275. ISSN : 1558-0679. DOI : 10.1109/TPWRS.2014.2374532. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/6996036> (visité le 03/07/2024).
- [222] Shaheen S. FATIMA, Michael WOOLDRIDGE et Nicholas R. JENNINGS. « A Linear Approximation Method for the Shapley Value ». In : *Artificial Intelligence* 172.14 (1^{er} sept. 2008), p. 1673-1699. ISSN : 0004-3702. DOI : 10.1016/j.artint.2008.05.003. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0004370208000696> (visité le 02/07/2024).
- [223] Emre TOKGÖZ et al. « Supply Network Design with Uncertain Demand : Computational Cooperative Game Theory Approach Using Distributed Parallel Programming ». In : *Computers & Industrial Engineering* 167 (1^{er} mai 2022), p. 108011. ISSN : 0360-8352. DOI : 10.1016/j.cie.2022.108011. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036083522200081X> (visité le 02/07/2024).

-
- [224] Liyang HAN et al. « Improving the Scalability of a Prosumer Cooperative Game with K-Means Clustering ». In : *2019 IEEE Milan PowerTech*. 2019 IEEE Milan PowerTech. Juin 2019, p. 1-6. doi : 10 . 1109 / PTC . 2019 . 8810558. url : <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.univ-catholille.fr/document/8810558> (visité le 02/07/2024).
- [225] « Scikit-Learn : Machine Learning in {P}ython ». In : ().

Annexe A

Annexe A

ANNEXE 1 - ILCD 2011 MIDPOINT IMPACT CATEGORIES

1 - Climate change: Global Warming Potential calculating the radiative forcing over a time horizon of 100 years.

2 - Ozone depletion: Ozone Depletion Potential (ODP) calculating the destructive effects on the stratospheric ozone layer over a time horizon of 100 years.

3 - Human toxicity, cancer effects: Comparative Toxic Unit for humans (CTUh) expressing the estimated increase in morbidity in the total human population per unit mass of a chemical emitted (cases per kilogramme). Specific groups of chemicals requires further works.

4 - Human toxicity, non-cancer effects: Comparative Toxic Unit for humans (CTUh) expressing the estimated increase in morbidity in the total human population per unit mass of a chemical emitted (cases per kilogramme). Specific groups of chemicals requires further works.

5 - Particulate matter: Quantification of the impact of premature death or disability that particulates/respiratory inorganics have on the population, in comparison to PM_{2.5}. It includes the assessment of primary (PM₁₀ and PM_{2.5}) and secondary PM (incl. creation of secondary PM due to SO_x, NO_x and NH₃ emissions) and CO.

6 - Ionizing radiation HH (human health): Quantification of the impact of ionizing radiation on the population, in comparison to Uranium 235.

7 - Ionizing radiation E (ecosystems): Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe) expressing an estimate of the potentially affected fraction of species (PAF) integrated over time and volume per unit mass of a radionuclide emitted (PAF m³ year/kg). Fate of radionuclide based on USEtox consensus model (multimedia model). Relevant for freshwater ecosystems.

8 - Photochemical ozone formation: Expression of the potential contribution to photochemical ozone formation. Only for Europe. It includes spatial differentiation.

9 - Acidification: Accumulated Exceedance (AE) characterizing the change in critical load exceedance of the sensitive area in terrestrial and main freshwater ecosystems, to which acidifying substances deposit. European-country dependent.

10 - Terrestrial eutrophication: Accumulated Exceedance (AE) characterizing the change in critical load exceedance of the sensitive area, to which eutrophying substances deposit. European-country dependent.

11 - Freshwater eutrophication: Expression of the degree to which the emitted nutrients reaches the freshwater end compartment (phosphorus considered as limiting factor in freshwater). European validity. Averaged characterization factors from country dependent characterization factors.

12 - Marine eutrophication: Expression of the degree to which the emitted nutrients reaches the marine end compartment (nitrogen considered as limiting factor in marine water). European validity. Averaged characterization factors from country dependent characterization factors.

13 - Freshwater ecotoxicity: Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe) expressing an estimate of the potentially affected fraction of species (PAF) integrated over time and volume per unit mass of a chemical emitted (PAF m³ year/kg). Specific groups of chemicals requires further works.

14 - Land use: Soil Organic Matter (SOM) based on changes in SOM, measured in (kg C/m²/a). Biodiversity impacts not covered by the data set.

Annexe **B**

Annexe B

Catégorie d'impact	Unité	1kWh transfo	1kWh Réseau sans transfo	1kWh Réseau
Climate change	kg CO2 eq	1,79E-01	8,98E-02	2,69E-01
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	1,97E-07	9,40E-08	2,91E-07
Human toxicity, non-cancer effects	CTUh	8,15E-08	6,81E-08	1,50E-07
Human toxicity, cancer effects	CTUh	1,25E-08	1,01E-08	2,26E-08
Particulate matter	kg PM2.5 eq	7,97E-05	5,19E-05	1,32E-04
Ionizing radiation HH	kBq U235 eq	1,19E+00	5,59E-01	1,75E+00
Photochemical ozone formation	kg NM-VOC eq	4,38E-04	2,42E-04	6,80E-04
Acidification	molc H+ eq	7,75E-04	4,98E-04	1,27E-03
Terrestrial eutrophication	molc N eq	1,59E-03	8,77E-04	2,47E-03
Freshwater eutrophication	kg P eq	5,74E-05	4,13E-05	9,87E-05
Marine eutrophication	kg N eq	2,23E-04	1,15E-04	3,39E-04
Freshwater ecotoxicity	CTUe	3,86E+00	1,23E+01	1,61E+01
Land use	kg C deficit	1,99E-01	1,71E-01	3,69E-01
Water resource depletion	m3 water eq	4,48E-03	2,15E-03	6,63E-03
Mineral, fossil & renewable resource depletion	kg Sb eq	1,05E-05	7,01E-06	1,75E-05

Catégorie d'impact	Unité	1kWh PV réseau	1kWh PV local	1kWh Nucléaire
Climate change	kg CO ₂ eq	1,78E-01	8,18E-02	1,91E-01
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	1,11E-07	9,46E-09	3,12E-07
Human toxicity, non-cancer effects	CTUh	1,11E-07	9,26E-08	1,13E-07
Human toxicity, cancer effects	CTUh	2,16E-08	1,18E-08	1,56E-08
Particulate matter	kg PM _{2.5} eq	1,27E-04	8,86E-05	1,00E-04
Ionizing radiation HH	kBq U235 eq	6,13E-01	9,27E-03	1,94E+00
Photochemical ozone formation	kg NM-VOC eq	5,72E-04	3,44E-04	4,91E-04
Acidification	molc H ⁺ eq	9,98E-04	6,61E-04	8,51E-04
Terrestrial eutrophication	molc N eq	1,89E-03	1,06E-03	1,79E-03
Freshwater eutrophication	kg P eq	8,15E-05	6,35E-05	6,49E-05
Marine eutrophication	kg N eq	2,20E-04	1,06E-04	2,89E-04
Freshwater ecotoxicity	CTUe	9,22E+00	1,31E+01	4,40E+00
Land use	kg C deficit	9,43E+00	1,26E-01	2,18E-01
Water resource depletion	m ³ water eq	3,49E-03	1,02E-03	6,57E-03
Mineral, fossil & renewable resource depletion	kg Sb eq	2,97E-05	2,83E-05	1,63E-05

Catégorie d'impact	Unité	1kWh Hydro	1kWh Gaz	1kWh Fioul
Climate change	kg CO2 eq	1,97E-01	8,42E-01	1,18E+00
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	2,11E-07	3,00E-07	3,61E-07
Human toxicity, non-cancer effects	CTUh	8,89E-08	8,89E-08	1,14E-07
Human toxicity, cancer effects	CTUh	1,47E-08	1,57E-08	1,82E-08
Particulate matter	kg PM2.5 eq	9,03E-05	1,05E-04	9,73E-04
Ionizing radiation HH	kBq U235 eq	1,27E+00	1,19E+00	1,25E+00
Photochemical ozone formation	kg NM-VOC eq	4,89E-04	1,21E-03	5,94E-03
Acidification	molc H+ eq	8,51E-04	1,44E-03	1,26E-02
Terrestrial eutrophication	molc N eq	1,78E-03	4,14E-03	2,16E-02
Freshwater eutrophication	kg P eq	6,27E-05	6,20E-05	7,02E-05
Marine eutrophication	kg N eq	2,46E-04	4,58E-04	2,05E-03
Freshwater ecotoxicity	CTUe	4,10E+00	4,24E+00	5,41E+00
Land use	kg C deficit	2,03E-01	3,62E-01	2,40E+00
Water resource depletion	m3 water eq	1,27E-02	4,98E-03	5,00E-03
Mineral, fossil & renewable resource depletion	kg Sb eq	1,13E-05	1,16E-05	1,51E-05

Catégorie d'impact	Unité	1kWh Eolien	1kWh Charbon	1kWh Bioénergie
Climate change	kg CO2 eq	1,08E-01	1,31E+00	1,27E+00
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	1,02E-07	2,08E-07	3,79E-06
Human toxicity, non-cancer effects	CTUh	6,16E-08	3,81E-07	3,34E-07
Human toxicity, cancer effects	CTUh	1,54E-08	7,12E-08	3,90E-08
Particulate matter	kg PM2.5 eq	5,86E-05	5,51E-04	1,27E-03
Ionizing radiation HH	kBq U235 eq	6,06E-01	1,20E+00	7,66E-01
Photochemical ozone formation	kg NM-VOC eq	2,96E-04	4,01E-03	6,54E-03
Acidification	molc H+ eq	5,16E-04	9,91E-03	1,28E-02
Terrestrial eutrophication	molc N eq	1,04E-03	1,50E-02	2,49E-02
Freshwater eutrophication	kg P eq	4,00E-05	6,51E-04	1,95E-04
Marine eutrophication	kg N eq	1,36E-04	1,52E-03	2,23E-03
Freshwater ecotoxicity	CTUe	6,07E+00	9,30E+00	1,32E+01
Land use	kg C deficit	2,82E-01	8,21E-01	4,99E+00
Water resource depletion	m3 water eq	2,36E-03	5,61E-03	1,91E-02
Mineral, fossil & ren resource depletion	kg Sb eq	7,58E-06	1,19E-05	2,79E-05

TABLEAU B.4 – Impacts environnementaux de l'énergie provenant du réseau calculés grâce la base de données Ecoinvent

SOREL

Supervision optimisée d'un réseau local de distribution au sein d'une communauté énergétique : prise en compte des critères électriques, environnementaux, économiques et sociétaux

Résumé

Le secteur de l'énergie est en pleine mutation. Les défis environnementaux, les contextes économiques et géopolitiques exigent une profonde transformation de la relation de nos sociétés à l'énergie. L'électrification de certains usages et le déploiement d'énergies renouvelables représentent des solutions pour relever ces défis, mais entraînent également une modification de la gestion des réseaux électriques. Chaque consommateur est ainsi amené à devenir un acteur de la gestion énergétique et à être sollicité par les opérateurs de réseau.

Ce travail se positionne comme exploratoire en proposant une nouvelle méthodologie de gestion énergétique. Celle-ci est proposée dans le cadre de communautés d'énergie équipées de production photovoltaïque, où l'électricité est distribuée de manière coopérative. Les motivations et sensibilités des membres de ces communautés sont prises en compte grâce à des méthodologies issues des sciences humaines et sociales. Les jeux coopératifs issus de la théorie des jeux ont permis de modéliser les interactions humaines au sein d'une communauté d'énergie. Les limites de ces modèles mathématiques dans la gestion énergétique ont été identifiées. Des solutions, comme une méthode de sous-division des jeux pour réduire le temps de calcul, ont été proposées, rendant la théorie des jeux applicable à de plus grandes communautés. Une méthodologie de quantification des impacts environnementaux, basée sur la méthode d'analyse de cycle de vie (ACV), est également proposée et intégrée dans le système de gestion énergétique.

Le résultat de ces recherches est une méthodologie de distribution d'énergie renouvelable dans laquelle les acteurs coopèrent pour augmenter leur satisfaction et améliorer l'efficacité du système d'énergie renouvelable. L'application et la comparaison de concepts de répartition des gains issus de la théorie des jeux a permis de soulever des questions éthiques et organisationnelles. Par ailleurs, la méthodologie de quantification des impacts environnementaux a contribué à mieux intégrer les enjeux environnementaux dans les travaux de gestion des réseaux électriques. Cette thèse est donc construite autour d'une interdisciplinarité entre les sciences de l'ingénieur et les sciences humaines et sociales. Elle propose une méthodologie qui répond à la fois aux problématiques techniques de la gestion de l'énergie, aux enjeux environnementaux et aux problématiques sociales.

Mots clés : energy management, energy community, interdisciplinarity, life cycle assessment

L2EP EA2697

Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de puissance de Lille – Université des Sciences et Technologies de Lille – 59655 Villeneuve d'Ascq – France

–

Abstract

The energy sector is undergoing significant changes. Environmental challenges, economic and geopolitical contexts, oblige us to reconsider the relationship between energy and our societies. Electrifying uses and deploying renewable energy sources are solutions to address these issues. They also lead to changes in the management of electrical grids. Each consumer will be asked to become an active participant in energy management and can be requested by grid operators.

This work is exploratory, proposing a new methodology for energy management. It is designed for energy communities equipped with photovoltaic production. Electricity is cooperatively managed by its stakeholders. The motivations and sensitivities of the community members are considered through methodologies derived from the social sciences and humanities. Game theory, and cooperative games in particular, has been applied to model consumer behavior, facilitating cooperation among participants. The limits of these mathematical models in their application to energy management have been studied. Solutions to these limitations have also been proposed. In particular, a method of subdividing the game to reduce computation time is presented, enabling game theory to be applied to larger communities. Additionally, an environmental impact assessment methodology, based on the Life Cycle Assessment approach, is proposed and integrated into the energy management system.

The results of this research are a methodology for distributing renewable energy in which participants collaborate to increase their satisfaction and enhance the efficiency of the renewable energy system. The application and comparison of gain distribution concepts from game theory have raised ethical and organizational questions. Furthermore, the environmental impact assessment methodology has allowed for better consideration of environmental issues in the management of electrical grids. This thesis is built on an interdisciplinary approach, combining engineering sciences with the social sciences and humanities. The proposed methodology addresses the technical challenges of energy management, and the environmental and social issues.

Keywords: gestion énergétique, communautés d'énergie, interdisciplinarité, analyse cycle de vie
