

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

STRATÉGIE DE GESTION OPTIMALE DE L'ÉNERGIE ET DE LA
PUISSANCE POUR UN GROUPE DE BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS
BASÉ SUR DES MULTI-AGENTS COOPÉRATIFS

THÈSE PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE DU
DOCTORAT EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
FARSHAD ETEDADI ALIABADI

NOVEMBRE 2023

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

DOCTORAT EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (PH.D.)

Direction de recherche :

Prof. Kodjo AGBOSSOU

Directeur de recherche

Prof. Sousso KELOUWANI

Codirecteur de recherche

Jury d'évaluation :

Prof. Kodjo AGBOSSOU

Directeur de recherche

Prof. Sousso KELOUWANI

Codirecteur de recherche

Prof. Alben CARDENAS

Président du jury

Prof. Nadjat ZIOUI

Évaluateur interne

Prof. Maude BLONDIN

Évaluateur externe

Thèse soutenue le 29 Septembre 2023

Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement mon directeur de thèse, le Professeur Kodjo Agbossou, et mon co-directeur de thèse, le Professeur Souso Kelouwani, pour la qualité de leur encadrement, leurs précieux conseils, leur soutien permanent et leur patience pendant la durée de mon doctorat. Leurs vastes connaissances et leur expérience m'ont encouragé tout au long de mes recherches académiques et dans ma vie quotidienne. Je tiens également à les remercier pour leurs commentaires constructifs, ainsi que pour leurs conseils à tous les stades de ma recherche. Je voudrais également profiter de cette occasion pour remercier le Dr. Nilson Henao et le Professeur Alben Cardenas qui ont suivi de près et supervisé le développement de mon travail, et le Dr. Abdoul Wahab Dante pour la révision du français. Je leur exprime ma gratitude pour leurs contributions et disponibilité tout au long de cette thèse. Je tiens également à remercier les chercheurs du Laboratoire des Technologies de l'Énergie (LTE) d'Hydro-Québec pour leur contribution scientifique, ainsi que pour le temps qu'ils ont consacré à nos échanges, à nos rencontres et à la révision des documents liés à mes travaux de recherche. Plus particulièrement, je tiens à remercier le Dr. François Laurencelle pour ses commentaires constructifs, nos rencontres et nos discussions afin d'améliorer mon travail en tenant compte des critères pratiques. D'autre part, je tiens à remercier les organismes subventionnaires qui ont fourni le soutien financier et les ressources nécessaires à la réalisation de ce travail de recherche et de mon programme d'études. Ces organismes sont le LTE d'Hydro-Québec, le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), la Fondation UQTR et Mitacs. Je tiens à exprimer ma gratitude sincère aux membres éminents du jury pour leur précieux temps, leur expertise et leurs commentaires éclairés, qui ont grandement contribué à l'amélioration de cette thèse. Finalement, je souhaiterais remercier toutes les personnes de l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène, en particulier mes collègues du LIREI avec qui j'ai eu le plaisir de travailler et de partager de très bons moments.

Je veux dédier ce travail de recherche à :

Mes parents,

Pour leur amour inconditionnel et leur soutien indéfectible qui ont été la pierre angulaire de mon parcours. Votre encouragement infini et vos sacrifices ont rendu cette réalisation possible. Pour avoir été et être toujours mon inspiration et la lumière qui éclaire mon chemin. Pour m'avoir appris qu'avec du travail et du dévouement, les rêves peuvent devenir réalité. Vous êtes mon modèle et mon exemple dans la vie. Merci de croire en moi à chaque étape.

Ma sœur et mes frères,

Pour leur amour, leurs conseils et leur soutien constant dans la réalisation de mes rêves.

Résumé

La réduction des pointes de consommation est l'un des défis majeurs de la gestion des systèmes électriques. Dans les régions froides telle que le Québec, les pics de la demande d'électricité se produisent en hiver, lorsque les systèmes de chauffage, principalement électriques, fonctionnent à plein régime. Ces pointes de consommation élevées entraînent une forte congestion sur le réseau électrique, ce qui génère des coûts supplémentaires pour le fournisseur d'électricité. La solution conventionnelle pour faire face à ce problème consiste à utiliser de mécanismes de gestion locale de la demande (DSM¹) de manière centralisée et/ou non-coordonnée. Le DSM peut être implémenté via des systèmes de gestion de l'énergie domestique (HEMS²). Les HEMS non-coordonnés³ comprennent des maisons intelligentes (SH⁴) qui prennent des décisions de manière indépendante sans considérer d'autres agents et sans participer à la satisfaction des objectifs du groupe (ensemble de bâtiments résidentiels). Une augmentation élevée du nombre de HEMS non-coordonnés dans le réseau de distribution peut entraîner des effets indésirables tels que des pics de rebond, des instabilités et des contingences à différents niveaux du réseau. Pour éviter ces effets et soulager le stress du réseau électrique, la coordination transactionnelle des HEMS est proposée dans ce travail. L'objectif recherché est de résoudre les défis locaux du réseau de distribution électrique des zones de voisinage via la coordination entre les ménages sans investissements en infrastructures significatifs, de minimiser les factures d'électricité des clients et de maximiser leur

1. DSM est l'abréviation de "Demand Side Management", en anglais (gestion locale de la demande, en français).

2. HEMS est l'abréviation de "Home Energy Management Systems", en anglais (systèmes de gestion de l'énergie domestique, en français).

3. Uncoordinated HEMS est l'abréviation de "uncoordinated home energy management systems", en anglais (systèmes de gestion de l'énergie domestique non-coordonnés, en français).

4. SH est l'abréviation de "Smart Homes", en anglais (maisons intelligentes, en français).

confort. En effet, l'objectif principal est de satisfaire en même temps les objectifs du groupe, tel que l'amélioration du facteur de charge, et les objectifs individuels dans une stratégie «gagnant-gagnant».

Ce projet de recherche propose une stratégie optimale de gestion automatisée de la puissance et de l'énergie à travers un marché monopolistique, basée sur la coordination transactionnelle d'agents dans un groupe de bâtiments résidentiels équipés de plinthes électriques activées en réponse à la demande DR¹. Nous avons proposé une coordination transactionnelle des systèmes de gestion de l'énergie domestique pour un groupe résidentiel. L'approche proposée est basée sur un mécanisme permettant de partager les objectifs entre agents et de résoudre les problèmes d'optimisation locale de manière distribuée dans chaque maison en considérant les objectifs communs. Dans le schéma de coordination présenté, l'objectif du groupe est d'améliorer le facteur de charge du profil agrégé et de minimiser le coût total. Aussi, les objectifs individuels des agents sont de minimiser la facture d'électricité, de maximiser le confort et de maximiser leur part du gain total. Cette thèse propose une politique d'incitation pour encourager les utilisateurs à participer à la coordination, développe un mécanisme équitable de partage des gains et conçoit un mécanisme compatible avec les incitations. De plus, la coordination dans un groupe résidentiel n'est pas suffisante pour atténuer les problèmes à différents niveaux du système de distribution. Nous avons donc également développé une coordination hiérarchique et transactionnelle de plusieurs groupes résidentiels. Par ailleurs, pour le cas de la coordination hiérarchique, un mécanisme a été proposé pour répartir les objectifs communs du coordinateur du réseau et des coordinateurs locaux entre les utilisateurs afin d'atténuer les défis spécifiques à chaque niveau du réseau. Un mécanisme de partage des contraintes couplées a été élaboré pour lier les niveaux supérieurs et inférieurs, et satisfaire les contraintes couplées en révisant les décisions des consommateurs. En outre, un mécanisme de partage des gains a été conçu pour distribuer équitablement le gain total du niveau le plus élevé de la hiérarchie aux clients du niveau le plus bas. La coordination transactionnelle des HEMS est bénéfique pour les consommateurs et les fournisseurs d'électricité, car ces systèmes peuvent entraîner une réduction des factures d'électricité et résoudre les problèmes du réseau.

1. DR est l'abréviation de "Demand Response", en anglais (réponse à la demande, en français)

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Table des matières	v
Table des figures	ix
Chapitre 1 - Introduction	1
1.1 Contexte général	1
1.2 Contexte spécifique.....	13
1.3 Hypothèses.....	18
1.4 Problématique de thèse	19
1.5 Objectifs et contributions.....	21
1.5.1 Objectifs spécifiques :	21
1.5.2 Contributions :	21
1.6 Méthodologie de recherche.....	22
1.7 Infrastructure de recherche	24
1.8 Structure de la thèse.....	25
Chapitre 2 - État de l'art	27
2.1 Aperçu des recherches sur les EMSs coordonnés/non-coordonnés.....	27
2.2 Les étapes de la coordination.....	30
2.2.1 Les topologies de coordination	31
2.2.1.1 Centralisée	32
2.2.1.2 Distribuée ou connexion en étoile (avec coordinateur) . . .	34
2.2.1.3 Décentralisée ou totalement distribuée (sans coordinateur) .	35

2.2.1.4	Partiellement distribuée (avec coordinateur)	35
2.2.1.5	Connexion en anneau	36
2.2.1.6	Connexion aléatoire	36
2.2.1.7	Connexion désirée	36
2.2.1.8	Discussions et conclusions	37
2.2.2	Méthodes de coordination	37
2.2.2.1	Méthodes de coordination basées sur le principe de décomposition	37
2.2.2.2	Méthodes de coordination non basées sur le principe de décomposition	40
2.2.2.3	Résumé des méthodes de coordination	40
2.3	Travaux précédents associés dans la littérature	42
2.3.1	Coordination des HEMS en un seul groupe	42
2.3.2	Coordination hiérarchique de plusieurs groupes HEMS	46
Chapitre 3 - Coordination des HEMS		51
3.1	Cadre et modélisation du système	51
3.2	Niveaux d'optimisation de la coordination des HEMS	53
3.2.1	Négociation entre l'agrégateur et le coordinateur	55
3.2.2	Coordination entre les HEMS (optimisation niveau 2)	56
3.2.3	Optimisation dans chaque SH (optimisation niveau 3)	56
3.3	Modélisation du système	57
3.3.1	Modèle de groupe résidentiel	57
3.3.2	Modèle de coût de l'électricité	58
3.3.3	Modèle de charges de maison	58
3.3.3.1	Plinthes Chauffantes Électriques Thermostats (EBHT)	59
3.3.3.2	Autres charges (charges fixes)	59
3.3.3.3	Comportement du consommateur et flexibilité	60
3.4	Formulation du problème et proposition de coordination des HEMS	61
3.4.1	Formulation du problème	61
3.4.2	Proposition de HEMS coordonnés et distribués	62

3.4.2.1	Les joueurs et la topologie :	62
3.4.2.2	Formulation du problème de la coordination des HEMS :	64
3.4.2.3	Fonction de récompense agrégée :	68
3.4.2.4	Mécanisme de partage des récompenses :	70
3.4.2.5	Mécanisme compatible avec les incitations (compatibilité des incitations) :	72
3.4.2.6	Mécanisme de facturation et échancier de coordination :	74
3.4.2.7	Mise en oeuvre de l'algorithme :	74
Chapitre 4 - Coordination hiérarchique des HEMS		79
4.0.1	Principales contributions	80
4.1	Cadre et modèle du système	81
4.1.1	Horizon temporel	82
4.1.2	Modèle des charges du consommateur	82
4.1.3	Inconfort des occupants	83
4.1.4	Groupe résidentiel et société	85
4.2	Formulation du problème et proposition de coordination hiérarchique	86
4.2.1	Problème centralisé	86
4.2.2	Coordination distribuée à un seul niveau du groupe résidentiel	88
4.2.3	Coordination hiérarchique (multi-niveaux) de la société	90
4.2.4	Coordination de niveau inférieur	91
4.2.5	Coordination de Niveau Supérieur	94
4.3	Mécanisme de partage des contraintes couplées	97
4.4	Mécanisme de distribution de gain	98
Chapitre 5 - Étude de cas, simulation et évaluation des performances		102
5.1	Coordination à un seul niveau	102
5.1.1	Configuration de la validation et étude de cas	102
5.1.2	Évaluation des performances	105
5.2	Coordination hiérarchique	114
5.2.1	Simulation et évaluation des performances	114

Chapitre 6 - Conclusions et Recommandations	136
6.1 Conclusions.....	136
6.2 Recommandations.....	138
6.3 Publications.....	140

Table des figures

1-1	Les piliers de la transition énergétique en 2050.	2
1-2	Demande de l'utilisateur final pour le secteur résidentiel modélisé au Canada Net zéro.	3
1-3	Le schéma d'un réseau comprenant les sections de production, de transmission, de distribution et de consommation [7].	4
1-4	Les caractéristiques d'un réseau électrique intelligent qui permet l'inclusion du consommateur [8].	5
1-5	Caractéristiques principales du système de gestion transactionnelle de l'éner- gie et comparaison avec d'autres approches bien connues.	6
1-6	Un exemple d'architecture de bâtiment résidentiel (HEMS) coordonnée. . . .	10
1-7	Profil de charge agrégé : Sans EMS, EMS non-coordonnés et EMS coordon- nés"[16]".	12
1-8	Un exemple d'architecture de cadre de coordination HEMS hiérarchique dans une société comprenant plusieurs groupes résidentiels.	13
1-9	Comparaison de la consommation d'énergie par habitant du Québec et du Canada avec celle des autres pays (GJ par habitant).	14
1-10	Production d'électricité par sources par secteur au Québec en 2018 [38], [39].	15
1-11	Consommation annuelle moyenne d'électricité par secteur au Québec en 2018 [38], [39].	15
1-12	Profil mensuel des besoins totaux en puissance au Québec (MW) [40].	16
1-13	Les charges les plus énergivores au Québec [41].	17

1-14	Puissance installée par Hydro-Québec et besoins de puissance en période de pointe [43]-[51].	18
1-15	Aperçu global de la méthodologie de recherche.	24
2-1	Aperçu des modèles existants de EMS résidentiel prenant en compte différentes sources d'énergie, différents modèles de paramètres des incertitudes, diverses méthodes de planification, des modèles de confort de l'utilisateur, différents modèles de charges et la fonctionnalité de multi-objectivité.	30
2-2	Étapes nécessaires pour la coordination des maisons intelligentes dans les voisinages. Les techniques de coordination et la topologie peuvent être utilisées pour améliorer les méthodes HEMS courantes.	31
2-3	L'architecture des différentes topologies de coordination qui illustre les connexions entre les agents et détermine les décideurs.	33
2-4	Un exemple de cadres de coordination directe et indirecte.	42
3-1	Le cadre de coordination des voisinages résidentiels.	52
3-2	L'architecture proposée pour la coordination des HEMS.	54
3-3	Niveaux d'optimisation dans le système HEMS coordonné proposé.	55
3-4	Le diagramme de blocs de l'approche proposée pour la coordination des HEMS.	63
3-5	Fonction de récompense totale payée par l'agrégateur au coordinateur.	69
3-6	Mécanisme de facturation et échancier de coordination.	76
3-7	L'algorithme de coordination HEMS proposé	77
3-8	Les fonctions objectives proposées pour le coordinateur et les HEMS.	77
4-1	Le diagramme de blocs de la société coordonnée des consommateurs	82
4-2	Topologie hiérarchique proposée pour la coordination des HEMS	96
4-3	Procédure de coordination des HEMS hiérarchique proposée	97
5-1	Points de consigne préférés des consommateurs pour les plinthes électriques.	105
5-2	Consommation totale agrégée et charges fixes dans le groupe résidentiel sans appliquer la réponse à la demande.	107

5-3	Consommation agrégée du groupe résidentiel après application de la réponse à la demande coordonnée proposée à différents niveaux de coordination. . . .	108
5-4	Recettes du DSO et facteur de charge profilé agrégé à différents niveaux de coordination.	109
5-5	Taux de récompense total et facteur de charge du profil agrégé à différents niveaux de coordination.	109
5-6	Profil de consommation des consommateurs après et avant le DR pour CR = 1.	110
5-7	Profil de consommation agrégé après DR pour 30 études de cas avec des préférences de consommateurs différentes : (a) CR = 1, (b) CR = 0.7, (c) CR = 0.4, (c) CR = 0.1, (c) CR = 0.05, (c) CR = 0.	111
5-8	Les écarts types réalistes de l'erreur de prévision de la température extérieure et de l'incertitude de la température extérieure à chaque étape du temps. . . .	112
5-9	Profil de consommation agrégé après DR pour 30 études de cas avec incertitude sur la température extérieure [CR = 1].	112
5-10	Parts des consommateurs dans le gain total pour CR = 1.	113
5-11	Les profils de base des groupes résidentiels dans la société (Société à cinq groupes)	115
5-12	Les profils de base des groupes résidentiels dans la société (Société à deux groupes)	116
5-13	Les profils agrégés de la société et des groupes avant et après l'application des contraintes couplées de capacité énergétique maximale dans les transformateurs de la société et des groupes résidentiels. La limite : [Groupes :25 kWh, Société :50 kWh]	117
5-14	Les profils agrégés de la société et des groupes avant et après l'application des contraintes couplées de capacité énergétique maximale dans les transformateurs de la société et des groupes résidentiels. La limite : [Groupes :20 kWh, Société :40 kWh]	118

5-15 Les profils agrégés de la société et des groupes avant et après l'application des contraintes couplées de capacité énergétique maximale dans les transformateurs de la société et des groupes résidentiels. La limite : [Groupes :18 kWh, Société :36 kWh]	119
5-16 Les profils agrégés de la société et des groupes avant et après l'application des contraintes couplées de capacité énergétique maximale dans les transformateurs de la société et des groupes résidentiels. La limite : [Groupes :15 kWh, Société :30 kWh]	120
5-17 Le profil agrégé de la société avant et après l'application de l'approche de coordination hiérarchique proposée, avec mise en évidence du prix et de l'effort de la société dans la révision de son profil.	121
5-18 Profils des groupes résidentiels avant et après la coordination hiérarchique avec mise en évidence de l'effort de chaque groupe ($CR = 1$). La société comprend cinq groupes résidentiels.	123
5-19 Profils des groupes résidentiels avant et après la coordination hiérarchique avec mise en évidence de l'effort de chaque groupe ($CR = 1$). La société comprend deux groupes résidentiels.	124
5-20 Profils des groupes résidentiels après la coordination hiérarchique avec mise en évidence de leur complémentarité d'action. La société comprend deux groupes résidentiels.	124
5-21 Comparaison des profils agrégés de la société pour les cas de base, de prix dynamique, de coordination indépendante et de coordination hiérarchique proposée.	127
5-22 Profil agrégé des groupes résidentiels avant l'application de l'approche de coordination proposée.	129
5-23 Profil agrégé des groupes résidentiels après application de l'approche dynamique des prix.	130
5-24 Profil agrégé des groupes résidentiels après application de l'approche de coordination indépendante proposée.	130

5-25 Profil agrégé des groupes résidentiels après application de l'approche de coordination hiérarchique proposée.	131
5-26 Part de chaque groupe résidentiel dans le gain total de la société	132
5-27 L'effort de chaque ménage dans le groupe résidentiel 1	133
5-28 L'effort de chaque ménage dans le groupe résidentiel 2	134
5-29 Part de chaque ménage dans le gain total de son groupe associé	135

Nomenclature

Coordination des HEMSs en un seul groupe

- δ_{\max} Niveau de confort maximal (mode confort)
- δ_i Niveaux de confort
- λ Variables duales
- C Ensemble de toutes les coalitions possibles de joueurs
- \bar{u} Moyenne des décisions de tous les clients
- \bar{Z} Moyenne des variables globales
- Ψ_i^A, Ψ_i^B , et Ψ_i^C Paramètres des coefficients thermiques de chaque maison
- ρ Taux de convergence
- ϕ_i Valeur de Shapley (parts des joueurs)
- C Coalition
- $C_1 \& C_2$ Paramètres permettant d'ajuster la forme de la fonction de récompense
- C_N Grande coalition
- CR Niveau de coordination
- $d_i^{u_i}(t)$ Inconfort de l'utilisateur
- F_{cons}^{shr} Objectif partagé : consommation d'énergie agrégée dans l'équipe

F_{fl}^{shr}	Objectif partagé : planéité du profil de consommation agrégée
F_i^{indv}	Fonction d'objectifs individuels de chaque ménage
F^{shr}	Fonction objectif partagé
H	Durée de l'horizon de temps
h	Horizon de temps
i	Index du consommateur ("maison")
J	Nombre de voisinages
j	Index des voisinages
k	Index d'itération
LF	Facteur de charge
M	Nombre de voisinages
N	Nombre d'agents
$NBHD_f$	Voisinage f
R	Nombre d'agrégateurs
R_{rate}	Taux de récompense totale
R_{Total}	Fonction de récompense totale
t	Tranche de temps
T_i	Température intérieure
T_i^{comf}	Température intérieure souhaitée (meilleur confort)
T_i^{max}	Températures intérieures maximales acceptables
T_i^{min}	Températures intérieures minimales acceptables

- u_i Profil de consommation d'énergie du chauffage électrique de la maison i
- $u_i^{EBH,max}$ Consommation d'énergie EBH maximale acceptable
- $u_i^{EBH,min}$ Consommation d'énergie EBH minimale acceptable
- u_i^{EBH} Profil énergétique (consommation) du consommateur i
- $U_{j,max}^{NBHD}$ Limite supérieure de l'énergie totale importée ou exportée par le voisinage j
- U^{CR} Profil agrégé après la coordination
- U^{NCR} Profil agrégé sans appliquer la coordination
- $v(C)$ Valuation des coalitions
- v_{C_N} Valeur de la grande coalition
- w_i Température extérieure
- Z Décisions du coordinateur (variables globales)
- π Prix de l'électricité 10 ¢/kWh
- $C_i^{u_i}$ Coût de l'énergie de la maison i
- $U_{a,max}^{RAa}$ Limite supérieure de l'énergie totale importée ou exportée par l'agrégateur RAa
- u_i^O Consommation totale des charges à l'exception de chauffage électrique

Coordination hiérarchique

- E Espérance
- G Index du niveau global (réseau ou société)
- L Index du niveau local (groupe)
- LG Index des liens entre les niveaux local et global
- N_{CR} Nombre de coordinateurs locaux (groupes)

N_{GCR}	Nombre de coordinateurs de réseau (sociétés)
N_H	Nombre de consommateurs (maisons)
p	Probabilité
$u_{ji}^T(h)$	L'énergie totale de le ménage i au moment h dans le groupe résidentiel j
U_{max}^H	Limite maximale d'énergie de maison
$U_{max}^{RG_j}$	Contrainte de capacité du groupe résidentiel j
U_{max}^S	Limite la capacité de la société
Var	Variance

Nomenclature

Coordination des HEMSs en un seul groupe

- δ_{\max} Niveau de confort maximal (mode confort)
- δ_i Niveaux de confort
- λ Variables duales
- C Ensemble de toutes les coalitions possibles de joueurs
- \bar{u} Moyenne des décisions de tous les clients
- \bar{Z} Moyenne des variables globales
- Ψ_i^A, Ψ_i^B , et Ψ_i^C Paramètres des coefficients thermiques de chaque maison
- ρ Taux de convergence
- ϕ_i Valeur de Shapley (parts des joueurs)
- C Coalition
- $C_1 \& C_2$ Paramètres permettant d'ajuster la forme de la fonction de récompense
- C_N Grande coalition
- CR Niveau de coordination
- $d_i^{u_i}(t)$ Inconfort de l'utilisateur
- F_{cons}^{shr} Objectif partagé : consommation d'énergie agrégée dans l'équipe

F_{fl}^{shr}	Objectif partagé : planéité du profil de consommation agrégée
F_i^{indv}	Fonction d'objectifs individuels de chaque ménage
F^{shr}	Fonction objectif partagé
H	Durée de l'horizon de temps
h	Horizon de temps
i	Index du consommateur ("maison")
J	Nombre de voisinages
j	Index des voisinages
k	Index d'itération
LF	Facteur de charge
M	Nombre de voisinages
N	Nombre d'agents
$NBHD_f$	Voisinage f
R	Nombre d'agrégateurs
R_{rate}	Taux de récompense totale
R_{Total}	Fonction de récompense totale
t	Tranche de temps
T_i	Température intérieure
T_i^{comf}	Température intérieure souhaitée (meilleur confort)
T_i^{max}	Températures intérieures maximales acceptables
T_i^{min}	Températures intérieures minimales acceptables

- u_i Profil de consommation d'énergie du chauffage électrique de la maison i
- $u_i^{EBH,max}$ Consommation d'énergie EBH maximale acceptable
- $u_i^{EBH,min}$ Consommation d'énergie EBH minimale acceptable
- u_i^{EBH} Profil énergétique (consommation) du consommateur i
- $U_{j,max}^{NBHD}$ Limite supérieure de l'énergie totale importée ou exportée par le voisinage j
- U^{CR} Profil agrégé après la coordination
- U^{NCR} Profil agrégé sans appliquer la coordination
- $v(C)$ Valuation des coalitions
- v_{C_N} Valeur de la grande coalition
- w_i Température extérieure
- Z Décisions du coordinateur (variables globales)
- π Prix de l'électricité 10 ¢/kWh
- $C_i^{u_i}$ Coût de l'énergie de la maison i
- $U_{a,max}^{RAa}$ Limite supérieure de l'énergie totale importée ou exportée par l'agrégateur RAa
- u_i^O Consommation totale des charges à l'exception de chauffage électrique

Coordination hiérarchique

- E Espérance
- G Index du niveau global (réseau ou société)
- L Index du niveau local (groupe)
- LG Index des liens entre les niveaux local et global
- N_{CR} Nombre de coordinateurs locaux (groupes)

- N_{GCR} Nombre de coordinateurs de réseau (sociétés)
- N_H Nombre de consommateurs (maisons)
- p Probabilité
- $u_{ji}^T(h)$ L'énergie totale de le ménage i au moment h dans le groupe résidentiel j
- U_{max}^H Limite maximale d'énergie de maison
- $U_{max}^{RG_j}$ Contrainte de capacité du groupe résidentiel j
- U_{max}^S Limite la capacité de la société
- Var Variance

Liste des acronymes

ADMM	L'algorithme des directions alternées en anglais "Alternating Direction Method of Multipliers"
ALADIN	Lagrangien augmenté direction alternée newton inexact en anglais "Augmented Lagrangian Alternating Direction Inexact Newton"
APP	Principe du problème auxiliaire en anglais "Auxiliary Problem Principle"
C+I	En anglais "Consensus + Innovations"
CHP	Production combinée de chaleur et d'électricité en anglais "Combined heat and power"
CPP	Tarification pour la période de pointe en anglais "Critical Peak Pricing"
DG	Générations distribuées en anglais "Distributed Generation"
DLC	Contrôle direct de la charge des clients en anglais "Direct Load Control"
DR	Réponse à la demande en anglais "Demand Response"
DSM	Gestion locale de la demande en anglais "Demand Side Management"
EBH	Chauffage des plinthes électriques en anglais Electric "Baseboard Heaters"
EMS	Systèmes de gestion de l'énergie en anglais Energy Management Systems en abréviation "EMS"
ESS	Systèmes de stockage d'énergie en anglais "Energy Storage System"

EUC	Fournisseur d'électricité en anglais "Electric Utility Company"
EV	Véhicules électriques en anglais "electric vehicles"
EVs	Véhicules électriques en anglais "Electric Vehicles"
HEMS	Systèmes de gestion de l'énergie domestique en anglais "Home Energy Management Systems"
IC	Compatible avec les mesures incitatives en anglais "Incentive Compatible"
LF	Facteur de charge en anglais "Load Factor"
MPC	Contrôle prédictif de modèle et d'électricité en anglais "Model Predictive Control"
NBHD	Voisinage en anglais "Neighborhood"
OCD	Décomposition des conditions d'optimalité en anglais "Optimality Condition Decomposition"
OPF	Flux d'énergie optimal en anglais "optimal power flow"
PMP	Passage des messages proximaux en anglais "Proximal Message Passing"
PV	Photovoltaïque en anglais "Photovoltaic"
RESs	Ressources énergétiques renouvelables en anglais "Renewable Energy Resources"
RTP	Prix dynamique en temps réel en anglais "Real Time Pricing"
RÉI	Réseaux Électriques Intelligents en anglais "smart grids"
SG	Réseaux Électriques Intelligents en anglais "Smart Grids"
SH	Maisons intelligentes en anglais "Smart Homes"
TOU	Prix basé sur la période d'utilisation en anglais "Time Of Use"
WT	Turbine éolienne en anglais "Wind Turbine"

Chapitre 1 - Introduction

Cette thèse est menée dans le cadre d'une recherche sur les stratégies de coordination transactionnelle des systèmes intelligents de gestion de l'énergie domestique qui contrôlent les chauffages électriques. Cette problématique est abordée en analysant à la fois les intérêts des fournisseurs d'électricité, tels qu'Hydro-Québec ¹ et des consommateurs. Plus spécifiquement, cette thèse vise à proposer de nouvelles méthodes pour modéliser des agents coopératifs et concevoir une coordination transactionnelle des systèmes de gestion de l'énergie domestique. La coordination est capable de gérer efficacement les charges électriques pour réduire la facture des consommateurs et atténuer les défis du réseau local sans compromettre le confort des clients. Nous présentons dans ce chapitre une description du contexte de la recherche, les hypothèses de recherche, la problématique abordée, les objectifs, les principales contributions, la méthodologie de recherche adoptée, l'infrastructure de recherche, et enfin la structure de la thèse.

1.1 Contexte général

Nous sommes confrontés aux défis de la transition énergétique qui vise à substituer les combustibles fossiles par des sources d'énergie plus propres et à diminuer les émissions d'ici à 2050. [1], [2]. Comme l'illustre la Figure 1-1, les six principaux piliers de la transition énergétique sont l'élimination du carbone, les ressources équilibrées, la fourniture de sources d'énergie sûres et à long terme, les énergies renouvelables, l'électrification, en particulier l'électrification des véhicules, et enfin l'efficacité énergétique et la présence de consommateurs actifs dans les secteurs résidentiel, commercial et industriel. Il est important de prendre en

1. Hydro-Québec est une entreprise publique responsable de la production, du transport et de la distribution de l'électricité au Québec. Hydro-Québec est un fournisseur d'énergie propre.

compte l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel car, après la transition énergétique et l'électrification, les consommateurs auront davantage de nouvelles charges telles que les véhicules électriques et les chauffages électriques.

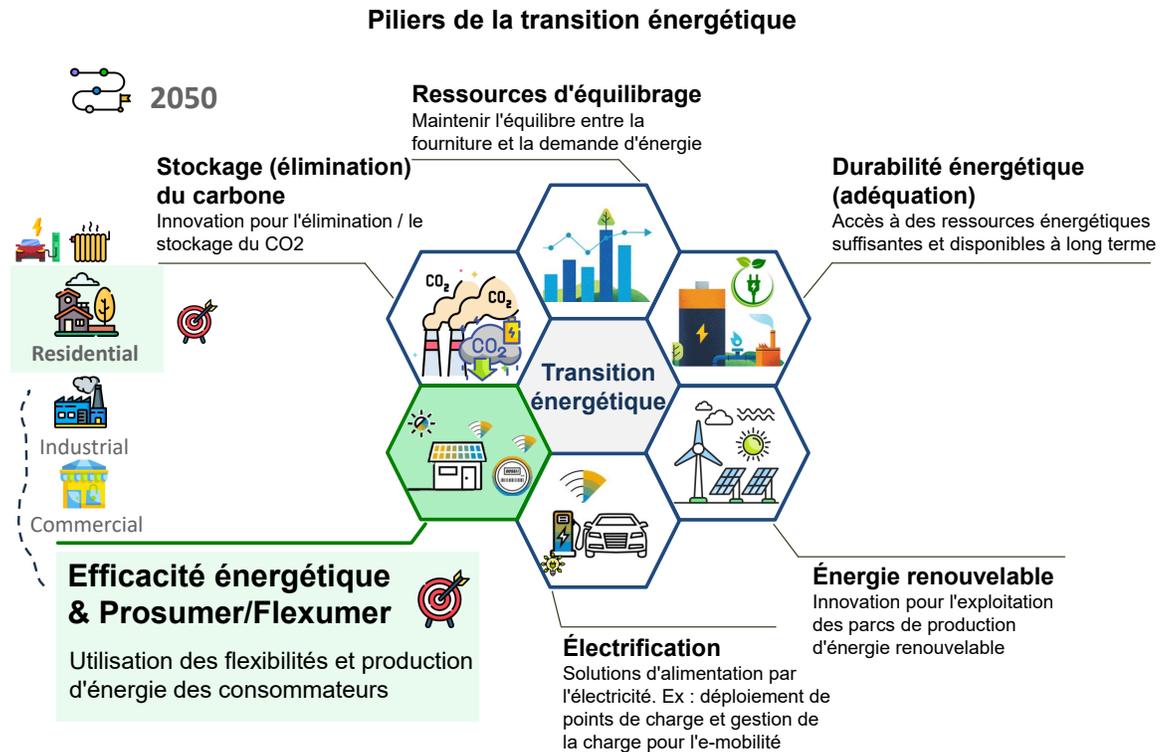


FIGURE 1-1 Les piliers de la transition énergétique en 2050.

Tel qu'illustré à la Figure 1-2, basée sur le rapport du régulateur de l'énergie du Canada [2], aujourd'hui, près de 43 % de l'énergie demandée dans le secteur résidentiel est sous forme d'électricité, et cette proportion augmentera jusqu'à 76 % en 2050. En fait, à l'avenir, il y aura plus d'électrification, comme les véhicules électriques et les chauffages électriques. C'est pourquoi, si nous voulons réaliser cette transition énergétique, nous devons gérer la forte demande d'électricité et réduire la pression sur le réseau.

La décarbonisation de divers secteurs économiques et la réduction de la pression correspondante sur le réseau électrique ont constitué des défis majeurs au cours des dernières décennies. Les parties prenantes du monde entier s'engagent de plus en plus à accélérer la transition énergétique et à établir des lignes directrices pour une utilisation responsable et efficace de l'énergie. Dans le contexte mondial et canadien, les réseaux électriques jouent

Progrès de la transition énergétique (résidentiel)

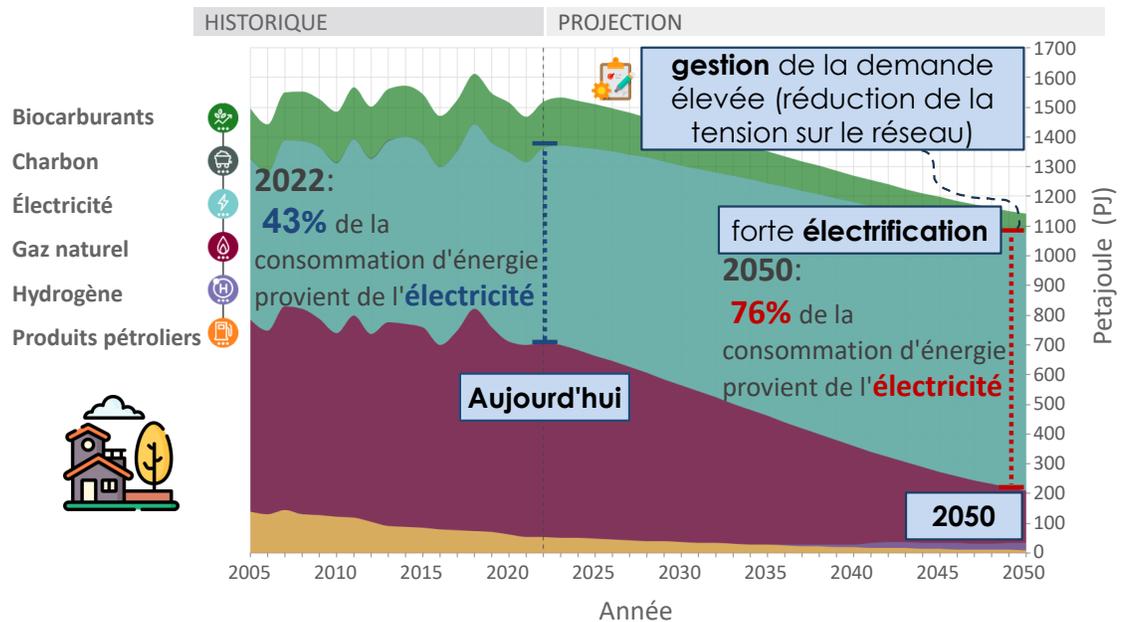


FIGURE 1-2 Demande de l'utilisateur final pour le secteur résidentiel modélisé au Canada Net zéro.

un rôle important non seulement comme source d'émissions de gaz à effet de serre, mais aussi comme support du processus d'électrification [3]. Cette situation a conduit à un intérêt accru autour de l'utilisation des sources d'énergie renouvelables (RESs ¹) ainsi que des systèmes de stockage d'énergie [4]-[6]. Cependant, l'infrastructure électrique existante semble inadaptée pour répondre aux demandes futures. Il est donc primordial de renforcer le système sur différents aspects afin de faire face aux défis et aux exigences de la transition énergétique.

La Figure 1-3 illustre le processus de transition du réseau conventionnel vers un système plus multidirectionnel et décentralisé. Plusieurs études et analyses démontrent les défis d'un réseau traditionnel en termes d'efficacité et de flexibilité [7]. La flexibilité peut être définie pour le réseau et les consommateurs ("individus"). La flexibilité du réseau se réfère à la capacité d'un réseau électrique à s'adapter dynamiquement à des conditions et des demandes changeantes, tout en maintenant la fiabilité et la durabilité. Un réseau flexible serait capable de

1. RESs est l'abréviation de "Renewable Energy Sources", en anglais (sources énergétiques renouvelables), en français.

gérer la volatilité de la fourniture et de la demande d'électricité et de parvenir à un équilibre durable. Il s'agit de la capacité à équilibrer l'offre et la demande d'électricité en incorporant diverses ressources, technologies et stratégies. La flexibilité des consommateurs, souvent appelée flexibilité individuelle dans le contexte de la gestion de la demande, se rapporte à la volonté et à la capacité des consommateurs d'ajuster leurs habitudes de consommation d'électricité en fonction des conditions du réseau ou des signaux de prix. Après avoir expliqué la notion de "La flexibilité", procédons maintenant à la définition de "L'efficacité". L'efficacité est la mesure de l'efficacité et de l'économie de la production, du transport, de la distribution, et de la consommation de l'énergie électrique au sein du réseau.

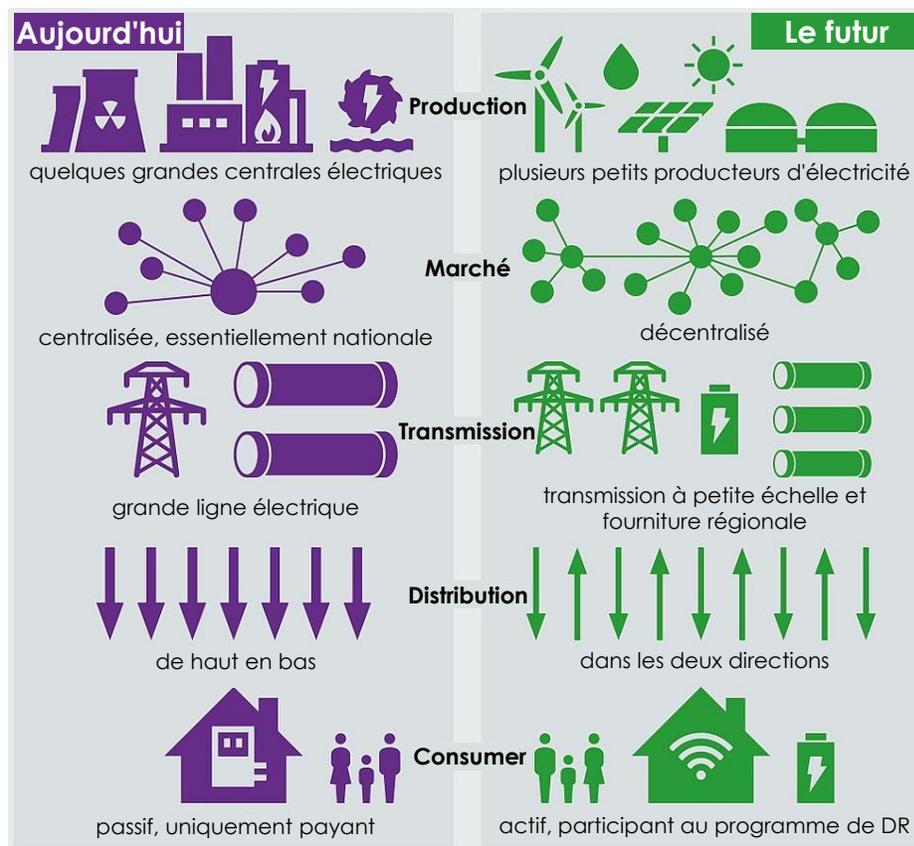


FIGURE 1-3 Le schéma d'un réseau comprenant les sections de production, de transmission, de distribution et de consommation [7].

Le système électrique existant repose sur une communication unidirectionnelle, les productions d'électricité à grande échelle sont principalement centralisées, la surveillance et la

restauration sont manuelles, et les consommateurs ont un contrôle limité sur leur consommation d'électricité. Les réseaux traditionnels ont des difficultés à intégrer les sources d'énergie renouvelables et à utiliser des systèmes modernes de gestion de l'énergie. Par conséquent, l'infrastructure doit être modernisée pour devenir intelligente et flexible.

Dans le cadre du paradigme du Réseau Électrique Intelligent (SG ¹), les problèmes du réseau conventionnel peuvent être résolus afin de garantir un système plus fiable, durable, efficace et flexible. Ainsi, un réseau capable d'offrir des services de marché en favorisant l'inclusion des consommateurs dans les processus d'optimisation. En effet, cette inclusion permet aux clients de participer plus activement à travers la modification de leur consommation. La Figure 1-4 présente les caractéristiques d'un réseau électrique intelligent [8].

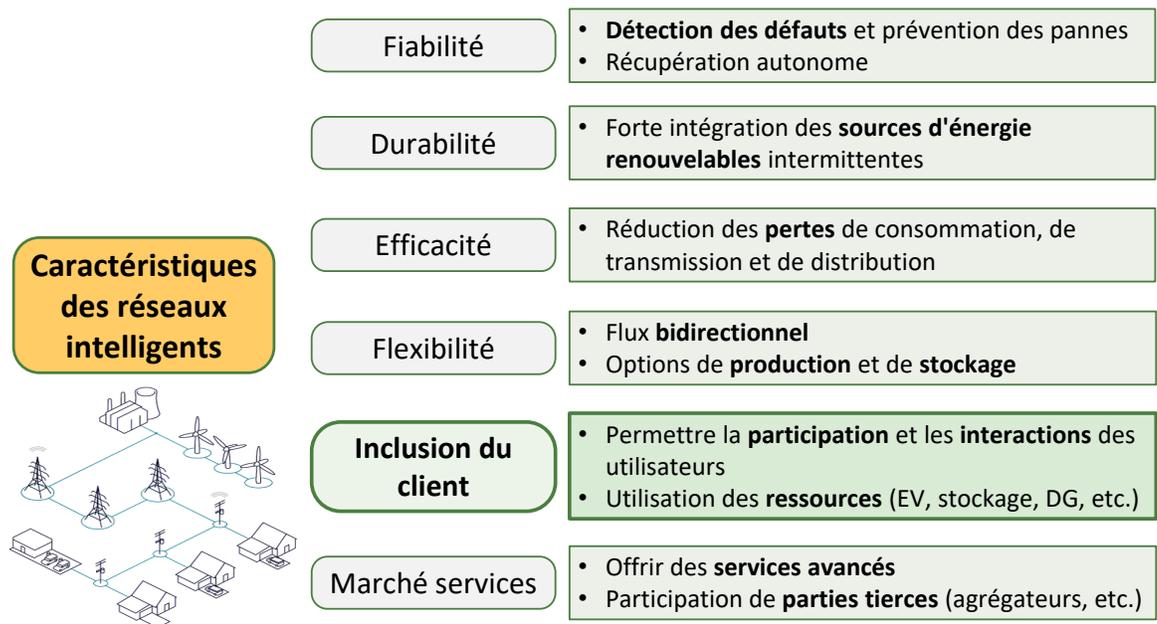
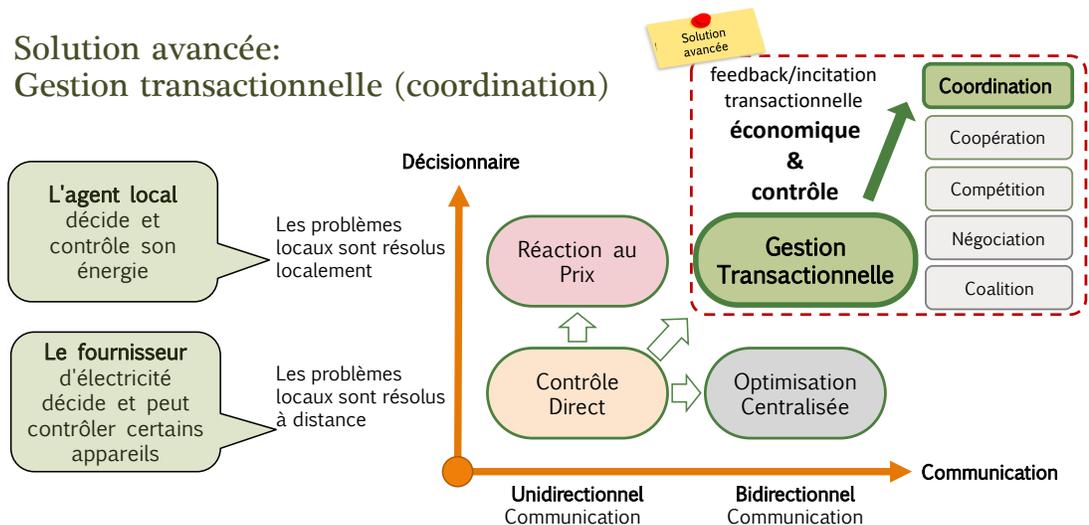


FIGURE 1-4 Les caractéristiques d'un réseau électrique intelligent qui permet l'inclusion du consommateur [8].

Les exemples de solutions conventionnelles pour résoudre le problème du réseau en incluant les consommateurs sont le contrôle direct, la réaction aux prix, et l'optimisation centralisée. Nous les comparons du point de vue de qui est le décideur et de quelle est la topologie de la communication. Cependant, la solution la plus avancée est la gestion transactionnelle de l'énergie. La gestion transactionnelle de l'énergie utilise des techniques

1. SG est l'abréviation de "Smart Grids" en anglais, (réseau électrique intelligent, en français)

économiques et de contrôle pour générer un retour d'information/incitatif transactionnel. Les principales caractéristiques du système de gestion transactionnelle de l'énergie et sa comparaison avec d'autres approches bien connues sont présentées dans la Figure 1-5. Dans la gestion transactionnelle de l'énergie, contrairement aux approches conventionnelles, chaque agent local peut résoudre son problème et prendre des décisions localement. De plus, les acteurs disposent d'une communication bidirectionnelle et peuvent échanger des données avec d'autres. Dans un système de gestion transactionnelle, les acteurs peuvent participer à la compétition, à la négociation, à la coalition, à la coopération ou à la coordination. Dans ce travail, nous concevons une approche pour la gestion transactionnelle basée sur la coordination des HEMS. De plus, chaque agent local peut résoudre son problème et prendre la décision localement. Tous les acteurs ont une communication bidirectionnelle et peuvent échanger des données avec d'autres acteurs ou des entités tierces. Ainsi, une gestion transactionnelle peut être utilisée pour coordonner la consommation et résoudre les problèmes du réseau local [9].



Adapté de Pacific Northwest National Laboratory; S. Widergren, "Transactive Energy for Distributed Resource Integration," 2016.

FIGURE 1-5 Caractéristiques principales du système de gestion transactionnelle de l'énergie et comparaison avec d'autres approches bien connues.

Dans le paradigme du réseau intelligent, le client est appelé à participer d'une manière active à la gestion des réseaux. Jusqu'à présent, le profil de la demande des clients a été en grande partie incontrôlable et inélastique par rapport aux conditions du réseau. La gestion

locale de la demande (DSM¹) est une fonction importante du réseau intelligent qui vise à permettre aux utilisateurs de prendre des décisions en matière de leur consommation d'énergie et à aider les fournisseurs d'électricité à modifier le profil de charge et à réduire les pics de demande [10]. Les communautés scientifiques et industrielles font des efforts, depuis plusieurs décennies, pour mettre en place des systèmes de gestion de l'énergie domestique (HEMS²). Les principales fonctions de ces systèmes sont de surveiller, de contrôler et d'optimiser la consommation de l'énergie [11] en modulant la courbe de charge chez les clients résidentiels pour réduire la puissance consommée pendant les périodes de pointe [12]. Ces différentes actions prises du côté du client en réponse aux besoins du système électrique (congestion du réseau, période de pointes ou prix élevés de l'électricité) sont associées au terme réponse à la demande (DR³) [13]. Certains décrivent la DR comme un moyen économique alternatif à l'ajout de production d'électricité lors de périodes de forte demande énergétique. Pour inciter les clients à participer à la gestion locale de la demande, les gestionnaires des systèmes électriques ont mis en œuvre plusieurs stratégies basées sur le prix de l'électricité et des mesures incitatives. Ces options visent à récompenser les clients impliqués dans la gestion des systèmes électriques tout en les soulageant en même temps pendant les périodes de forte congestion [14]. Parmi les options basées sur les prix nous pouvons citer l'option de prix basé sur la période d'usage (TOU⁴), le prix dynamique en temps réel (RTP⁵), la tarification pour la période de pointe (CPP⁶) et le contrôle direct de la charge des clients (DLC⁷) par le gestionnaire pendant les périodes de pointe moyennant une compensation ou un incitatif [11]. De nombreux travaux ont été proposés dans la littérature sur les HEMS et il existe une variété de modèles sur le marché pour ces systèmes. La plupart de ces travaux sur les HEMS se concentrent sur le principe d'un prix basé sur la période d'usage

1. DSM est l'abréviation de "Demand Side Management", en anglais (gestion locale de la demande en français)

2. HEMS est l'abréviation de "Home Energy Management Systems", en anglais (gestion de l'énergie domestique en français)

3. DR est l'abréviation de "Demand Response", en anglais (gestion réponse à la demande, en français)

4. TOU est l'abréviation de "Time Of Use", en anglais (prix basé sur la période d'usage, en français).

5. RTP est l'abréviation de "Real Time Pricing", en anglais (prix dynamique en temps réel, en français).

6. CPP est l'abréviation de "Critical Peak Pricing", en anglais (tarification pour la période de pointe, en français).

7. DLC est l'abréviation de "Direct Load Control", en anglais (contrôle direct de la charge des clients, en français).

(TOU) et du prix dynamique en temps réel afin de déplacer la consommation de certaines charges non-critiques ou flexibles vers des périodes où l'électricité coûte moins cher. Par conséquent, le développement de méthodes innovantes de gestion de l'énergie dans les zones de voisinage (du réseau de distribution) est essentiel pour permettre aux systèmes de gestion de l'énergie domestique d'intégrer les générations distribuées (DG ¹) et les systèmes de stockage d'énergie (ESS ²) dans les zones de voisinage. À cet égard, la coordination entre les HEMS intelligents peut être définie comme une solution appropriée pour concevoir de nouveaux systèmes de gestion de l'énergie (EMS ³) pour les voisinages, comprenant DGs, véhicules électriques (EVs ⁴) et ESS. La coordination est l'unification, l'intégration et la synchronisation des efforts des membres du groupe pour produire une unité d'actions pour poursuivre des objectifs communs [15]. Dans le réseau intelligent, la coordination est le processus d'organisation des entités pour qu'elles travaillent correctement ensemble pour atteindre des objectifs partagés. Ces entités peuvent être des maisons intelligentes (SH ⁵), des coordinateurs, des agrégateurs, des producteurs et des fournisseurs d'électricité en termes d'acteurs rationnels et autonomes [16], [17]. Récemment, le concept de coordination a été appliqué pour améliorer la gestion locale de la demande [18], la réponse à la demande (DR) [19], la planification des EVs [20], la gestion des énergies renouvelables [21], l'exploitation des systèmes de stockage [22] et des exercices de flux de puissance optimale (OPF⁶) [23]. Les travaux [24]-[26] ont coordonné des entités au niveau du voisinage et rapporté des réductions de la facture d'électricité des ménages respectivement de 26,63%, 18% et 9,4%. Du point de vue de la faisabilité, des technologies et des plateformes telles que pando par lo3energy [27], Brooklyn Microgrid [28], Hilo d'Hydro-Québec [29], centrales électriques virtuelles [30], OpenADR [31] et VOLTTRON™ [32] ont été développées pour faciliter la mise en œuvre d'EMS coordonnés. Ces plateformes utilisent les technologies de l'information et de la communication, le cloud computing et l'internet des objets pour le partage de données et la communication [33]. D'autre part, les HEMS non coordonnés représentent les SH qui

-
1. DG est l'abréviation de "Distributed Generation", en anglais (générations distribuées, en français).
 2. ESS est l'abréviation de "Energy Storage System", en anglais (systèmes de stockage d'énergie, en français).
 3. EMS est l'abréviation de "Energy Management Systems", en anglais (systèmes de gestion de l'énergie, en français).
 4. EVs est l'abréviation de "Electric Vehicles" (véhicules électriques en français).
 5. SH est l'abréviation de "Smart Homes", en anglais (maisons intelligentes, en français).
 6. OPF est l'abréviation de "Optimal Power Flow", en anglais (flux de puissance optimal, en français).

n'échangent pas de données avec d'autres entités, évitent de participer à la coordination directement avec leurs voisins pour atteindre des objectifs communs et prennent des décisions de manière indépendante sans considérer les autres. La pénétration de tels systèmes peut apporter différents défis aux zones de voisinage tels que les pics de rebond, les instabilités et les contingences [16]. Ils peuvent contester l'aplatissement du profil de charge agrégé et les économies de coûts d'électricité des ménages. Les HEMS coordonnés présentent plusieurs avantages par rapport aux HEMS non-coordonnés. Dans le cas de l'HEMS coordonné, les SH partagent des données et collaborent les uns avec les autres pour satisfaire les préférences des consommateurs, les objectifs individuels et les objectifs du voisinage. La coordination des SH permet simultanément d'optimiser l'efficacité énergétique, d'utiliser les potentiels de flexibilité et de réduire les factures d'électricité. La coordination en exploitant la flexibilité des utilisateurs peut être destinée à concevoir des solutions innovantes pour atténuer le stress du système d'alimentation électrique et résoudre les défis du voisinage sans investissements considérables des infrastructures [34]. La coordination HEMS peut soulever des opportunités qui non seulement encouragent la participation des SH, mais desservent également les réseaux de distribution en aplatissant le profil de charge, en promouvant les échanges d'énergie, en gérant les ressources énergétiques distribuées et en équilibrant d'une meilleure façon la consommation et la production. Il peut indirectement conduire à d'autres avantages tels que l'augmentation du facteur de charge, la diminution des pertes du réseau, l'amélioration de la fiabilité du service, le report du développement du réseau et la réduction des polluants environnementaux. Les HEMS coordonnés qui utilisent régulièrement un mécanisme de décision distribué peuvent réduire les calculs, augmenter la vitesse du processus, et gérer les échanges de données. D'autre part, les approches DSM conventionnelles ne peuvent pas offrir les avantages fournis par les HEMS coordonnés [16]. En conséquence, la coordination des HEMS est devenue un point névralgique de la recherche. Il est essentiel de considérer la coordination des HEMS dans les futurs réseaux électriques intelligents. Différentes méthodes et topologies ont été employées pour implémenter la coordination. La Figure 1-6 illustre un exemple du réseau avec coordination des HEMS dans chaque groupe résidentiel.

Chaque HEMS peut contrôler différents éléments tels que les charges résidentielles, les ressources locales et les ESSs. Chaque agrégateur alimente plusieurs voisinages au niveau

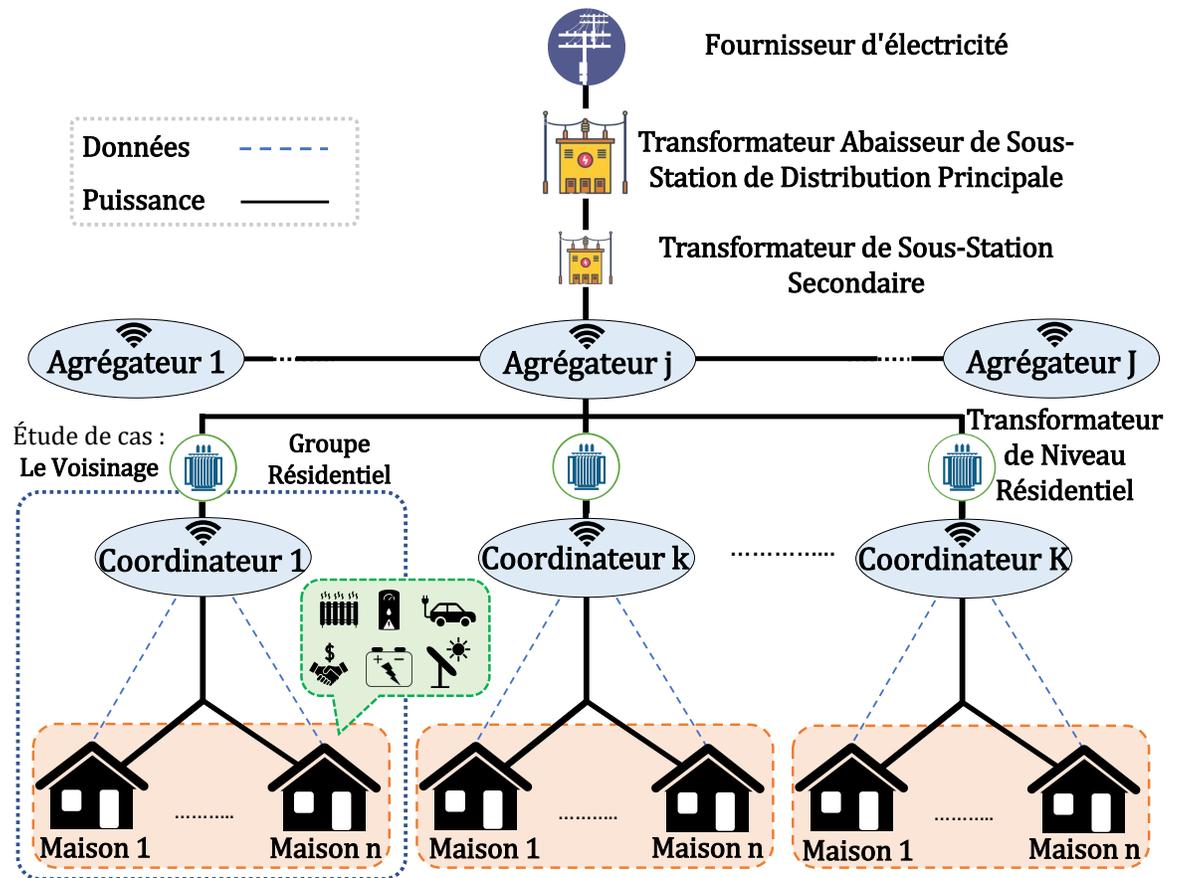


FIGURE 1-6 Un exemple d'architecture de bâtiment résidentiel (HEMS) coordonnée.

secondaire du transformateur de distribution. Les agrégateurs sont responsables de l'échange de données avec le fournisseur d'électricité et les voisinages. Selon le type de topologie de coordination, chaque voisinage peut être connecté à un coordinateur comme une entité indépendante. Le coordinateur est responsable de la coordination des SH en échangeant leurs données avec l'agrégateur. Il communique avec les SH pour conduire leurs actions et garantir les objectifs du voisinage. Selon la topologie et le mécanisme de coordination, le décideur peut être soit les HEMS, soit le coordinateur, soit l'agrégateur, ou soit le fournisseur d'électricité. Le voisinage se compose de ménages ayant différents niveaux de flexibilité, des préférences distinctes, divers types de charges, de DGs et d'ESSs. L'idée principale est d'adresser les défis du réseau local en utilisant la coordination dans des voisinages ciblés. L'algorithme de coordination devrait être simplement applicable non seulement aux systèmes de distribution existants mais aussi aux consommateurs qui souhaitent participer sans difficulté. La stratégie de coordination devrait être pertinente pour les propriétaires qui décident de transformer leur

maison en bâtiment intelligent. Les HEMS doivent collaborer comme les membres d'une équipe pour atteindre les objectifs individuels et communs. Pour clarifier l'idée des HEMS coordonnés, deux exemples sont présentés.

Dans [35], un processus de coordination a été présenté dans lequel les HEMS reçoivent le prix de l'électricité de l'agrégateur, optimisent leurs usages d'électricité, et renvoient les résultats à l'agrégateur. Par conséquent, l'agrégateur calcule le profil de charge agrégé et le renvoie aux utilisateurs avec les autres informations requises. Ensuite, les consommateurs optimisent à nouveau leur profil de charge afin d'aplanir la demande de charge totale et de conserver les résultats des coûts précédents. Dans cet exemple, un coordinateur externe n'a pas été envisagé et donc l'agrégateur coordonne directement les SH. Par une coordination entre les ménages, il est possible de diminuer les pics et d'éviter les effets de rebond. Ces effets peuvent être créés lorsque les HEMS travaillent de manière non-coordonnée pour déplacer leurs charges contrôlables vers les périodes où les prix sont les plus bas.

Ce fait a été démontré dans l'étude [16] où une gestion optimale décentralisée de la charge résidentielle a été proposée, qui compare le profil de charge agrégé d'un voisinage dans les conditions suivantes : i) sans aucun DSM, ii) avec un DSM non-coordonné, et iii) avec un DSM coordonné. La Figure 1-7 compare les HEMS coordonnés avec les HEMS non-coordonnés dans cette zone de voisinage. Selon la comparaison, représentée par la Figure 1-7, le pic s'est produit vers 18h sans aucun DSM alors que le pic de rebond a eu lieu vers 2h avec le DSM non-coordonné. Nous pouvons observer que la coordination des systèmes de gestion de la demande a permis d'aplanir le profil de la charge.

La mise en œuvre et les applications des mécanismes de coordination des HEMS sont différentes selon les pays en raison de leurs réglementations, de leurs politiques de tarification, des conditions météorologiques, de la disponibilité des énergies renouvelables, des modes de consommation et des structures des réseaux électriques [36], [37]. Les applications de coordination des HEMS sont diverses. Il permet d'atteindre les objectifs partagés et de résoudre les défis locaux. Le concept de coordination peut être utilisé pour aplanir le profil de charge agrégé du voisinage, réduire les factures d'électricité des ménages, faciliter les échanges d'énergie entre les SH, diminuer les flux d'énergie inversés, gérer les ressources énergétiques distribuées et modifier les habitudes de consommation et de production des consommateurs.

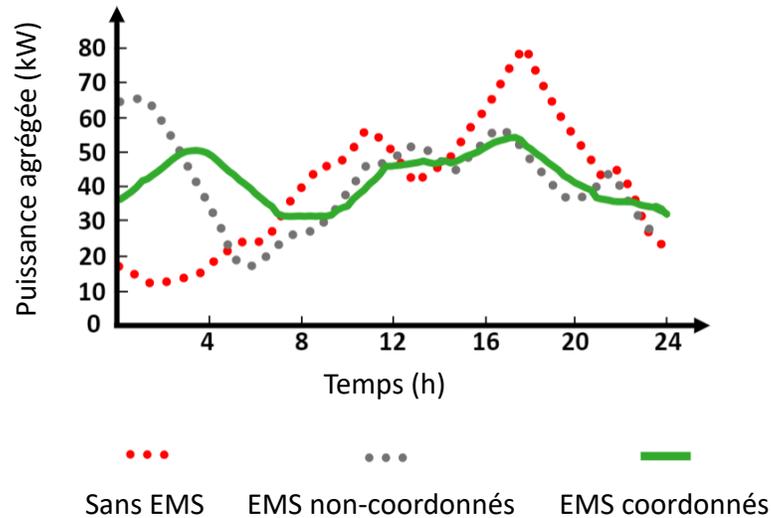


FIGURE 1-7 Profil de charge agrégé : Sans EMS, EMS non-coordonnés et EMS coordonnés"[16]".

Le défi majeur de la mise en œuvre de HEMS coordonnés dans les zones de voisinage est de concevoir un mécanisme de coordination équitable pour satisfaire à la fois les objectifs partagés (voisinage) et les objectifs individuels (consommateurs) dans une stratégie «gagnant-gagnant».

De plus, une coordination hiérarchique multi-niveaux des HEMS est nécessaire pour relever les défis à différents niveaux du système de distribution, et pas seulement à un niveau spécifique comprenant un groupe résidentiel. En fait, deux niveaux de coordination au moins sont nécessaires : le niveau supérieur (coordinateurs du réseau) et le niveau inférieur (coordinateurs des groupes résidentiels locaux). Le coordinateur de niveau supérieur tente de coordonner les coordinateurs de niveau inférieur. Chaque coordinateur de niveau inférieur gère un ensemble de maisons intelligentes dans un groupe résidentiel. La coordination transactionnelle et hiérarchique des HEMS diminue la quantité de calculs aux niveaux supérieurs de la hiérarchie et résout les problèmes locaux à chaque niveau du système de distribution. Un exemple d'architecture hiérarchique du cadre de coordination du HEMS dans un système de distribution électrique comprenant plusieurs agrégateurs est présenté à la Figure 1-8. Chaque agrégateur est connecté à une société ¹ incluant plusieurs groupes résidentiels.

La consommation d'énergie des chauffages électriques est la fraction la plus importante de

1. Dans ce travail, il est défini que la société comprend plusieurs groupes résidentiels et constitue une communauté plus grande d'agents (systèmes de gestion de l'énergie domestique).

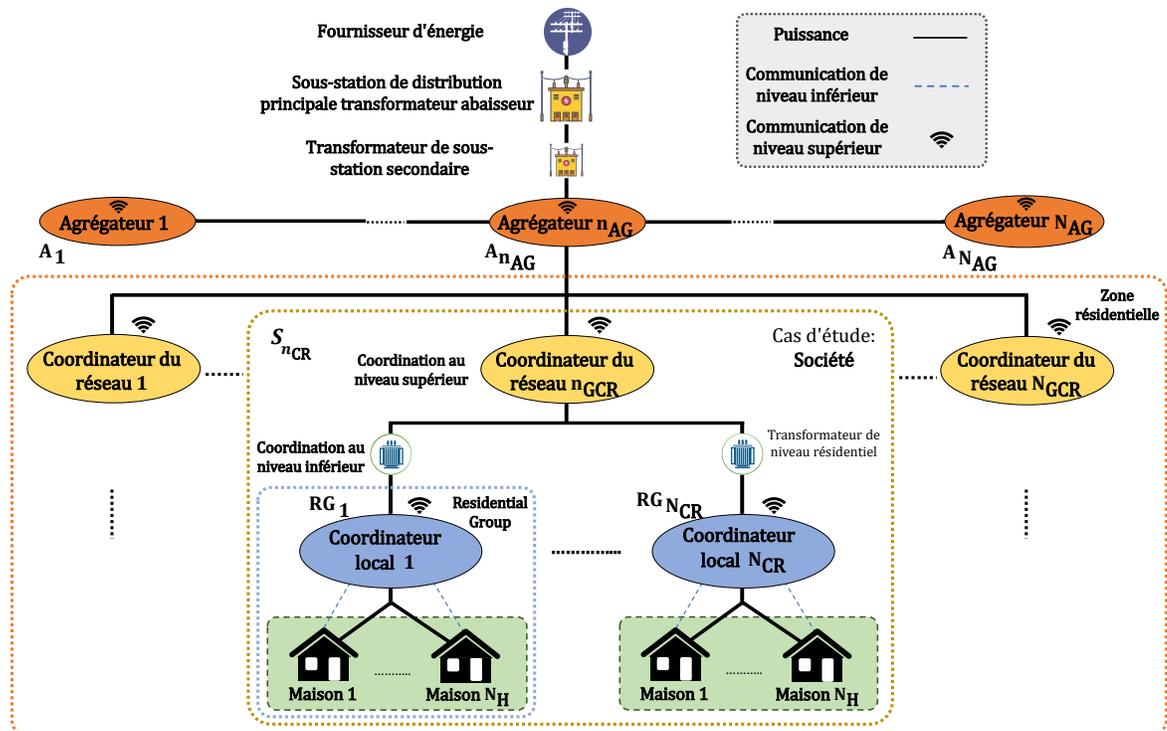


FIGURE 1-8 Un exemple d'architecture de cadre de coordination HEMS hiérarchique dans une société comprenant plusieurs groupes résidentiels.

la consommation d'électricité au Québec en raison de ses hivers froids. Par conséquent, pour résoudre les problèmes du réseau local à différents niveaux du système de distribution, il est nécessaire d'envisager une coordination transactionnelle et hiérarchique (multi-niveau) des systèmes HEMS avec des thermostats résidentiels activés en réponse à la demande.

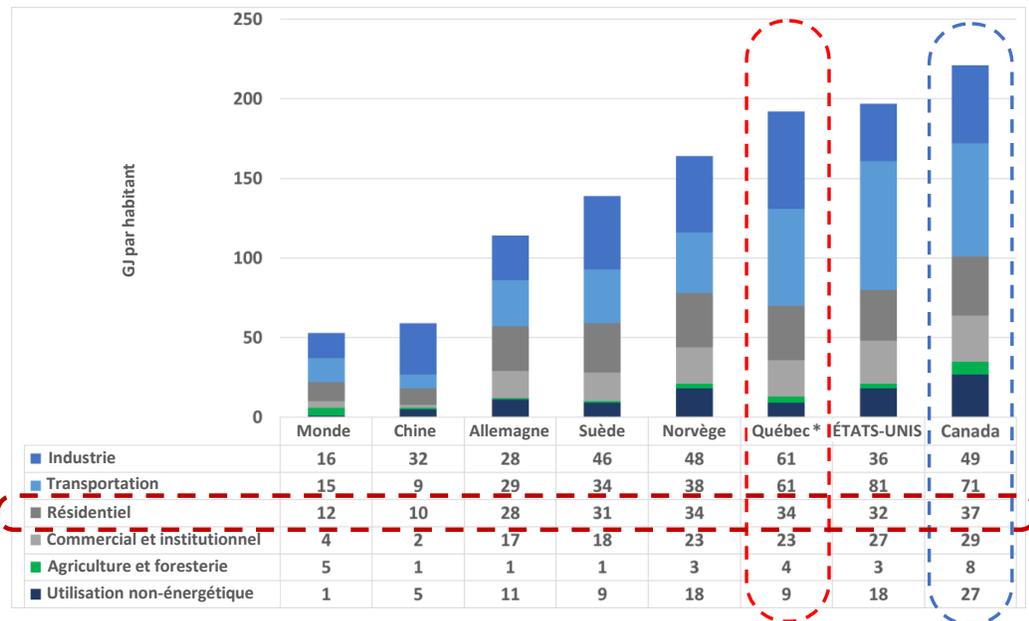
1.2 Contexte spécifique

La fourniture de l'énergie électrique demandée dans le réseau, l'amélioration du facteur de charge (LF¹) du profil de charge agrégé et la réduction de la consommation de pointe sont parmi les principaux défis de la gestion des systèmes électriques. La comparaison de la consommation d'énergie par habitant du Québec et du Canada avec celle d'autres pays a été illustrée dans la Figure 1-9. Cette Figure révèle que le Québec et le Canada sont parmi les plus grands consommateurs d'énergie. Selon les données soulignées dans la Figure 1-9, le

1. LF est l'abréviation de "Load Factor", en anglais (facteur de charge, en français).

secteur résidentiel au Québec est l'un des secteurs ayant le plus haut niveau de consommation d'énergie avec une consommation de 34GJ par habitant/an.

Comparaison de la consommation d'énergie par habitant du Québec et du Canada avec celle des autres pays (GJ par habitant)



Source: Statistics Canada, 2018 (table 11-10-0222-01) and IEA 2018

FIGURE 1-9 Comparaison de la consommation d'énergie par habitant du Québec et du Canada avec celle des autres pays (GJ par habitant).

Selon les données rapportées sur l'état de l'énergie au Québec par Statistique Canada [38] et le rapport sur le développement durable d'Hydro-Québec en 2018 [39], la consommation et la production totales d'énergie électrique sont respectivement de 173 TWh et 212 TWh. La production totale d'électricité et la consommation annuelle moyenne d'électricité au Québec sont illustrées respectivement par la Figure 1-10 et la Figure 1-11. La Figure 1-10 met en évidence la part de chaque ressource énergétique dans la production d'électricité au Québec. De même, la Figure 1-11 montre la consommation d'électricité des clients par secteur au Québec. Les données prouvent que la production est supérieure à la consommation et qu'elle peut permettre de fournir la totalité de la puissance annuelle demandée au Québec. Cependant,

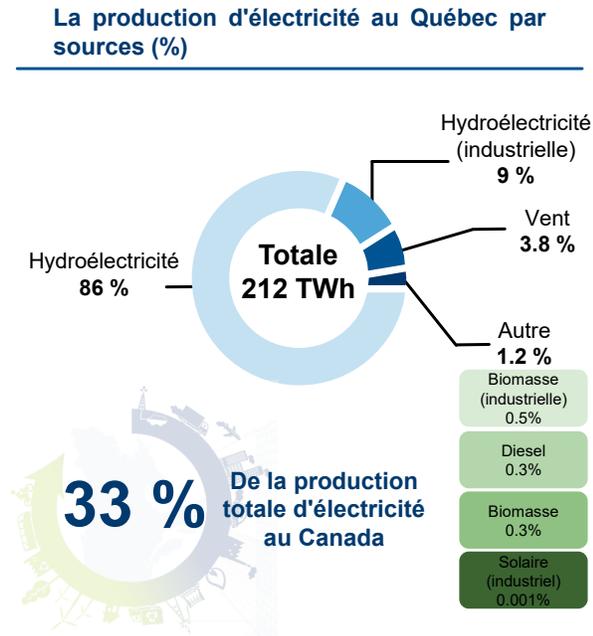


FIGURE 1-10 Production d'électricité par sources par secteur au Québec en 2018 [38], [39].

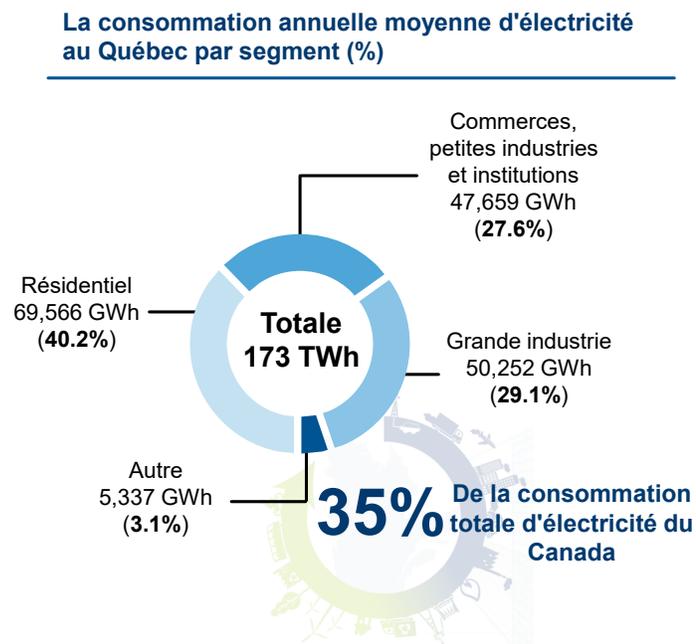


FIGURE 1-11 Consommation annuelle moyenne d'électricité par secteur au Québec en 2018 [38], [39].

il est possible, en certains jours et certaines heures, en cas d'augmentation significative de la demande, que surviennent des pointes fortes et la demande totale dépasse la puissance totale installée. Par exemple, sur la base des données fournies par Hydro-Québec de 2017 à 2020,

comme présenté dans la Figure 1-12, pendant certains jours en période hivernale, la demande totale dépasse la puissance totale installée (37 310 MW). Par conséquent, le réseau électrique québécois de demain doit être en mesure de répondre aux demandes de pointe.

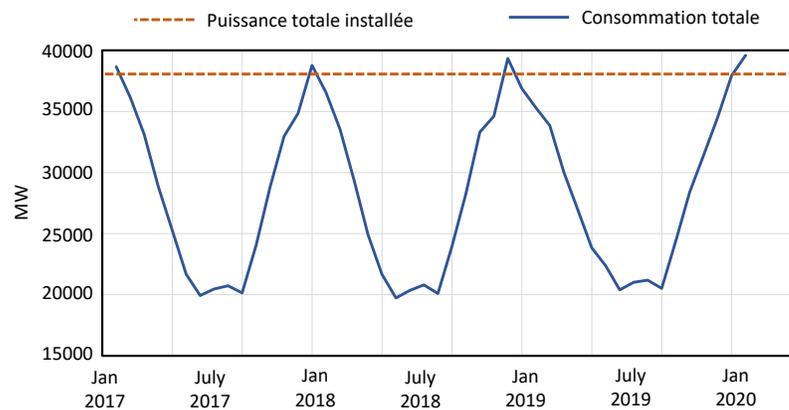


FIGURE 1-12 Profil mensuel des besoins totaux en puissance au Québec (MW) [40].

Selon les données présentées par le rapport sur le développement durable d'Hydro-Québec [39] que montre dans la Figure 1-11, la majeure partie de la demande d'électricité est associée au secteur résidentiel (69 566 GWh ou 40,2 % de la consommation annuelle totale). Dans le secteur résidentiel au Québec, comme le montre dans la Figure 1-13, les systèmes de chauffage sont principalement électriques et les pics maximums de la demande en électricité se produisent en hiver en raison du fonctionnement à plein régime des systèmes de chauffage électrique des espaces et des chauffe-eaux [41]. Comme la Figure 1-13 l'illustre, les chauffe-eau et les systèmes de chauffage et de climatisation représentent respectivement environ 20% et 54% de la consommation résidentielle au Québec. Par conséquent, ce projet de recherche se concentre sur le contrôle des appareils les plus consommateurs d'énergie afin d'atténuer les pics de consommation.

La Figure 1-14 souligne les périodes où la puissance demandée a atteint ou dépassé la capacité installée d'Hydro-Québec durant les dernières années. Ces pointes de consommation se sont produites en hiver, généralement en semaine, entre 6h et 9h ou entre 16h et 20h. La Figure 1-14 souligne qu'au cours des années 2010, 2012 à 2015, 2017 et 2018, la puissance installée a été dépassée par la puissance demandée sur le réseau québécois. Ces fortes demandes momentanées de puissance obligent Hydro-Québec à effectuer des achats à court terme sur

Consommation annuelle moyenne d'électricité des foyers québécois (%)

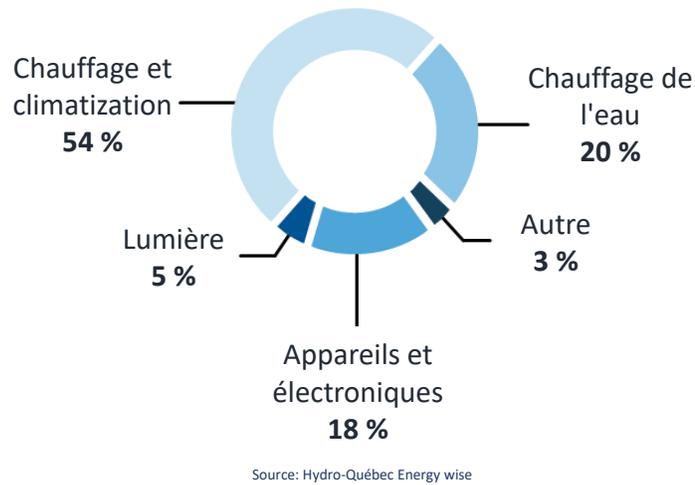


FIGURE 1-13 Les charges les plus énergivores au Québec [41].

les marchés voisins, à des tarifs très élevés [42]. La présence de ces périodes de pointe oblige Hydro-Québec à faire des investissements supplémentaires, car le réseau doit être surdimensionné pour pouvoir réagir aux dépassements de puissance momentanés en tout temps. De plus, comme l'efficacité du réseau de distribution est affectée (augmentation des pertes de transmission), Hydro-Québec doit faire des efforts supplémentaires pour maintenir les niveaux de qualité. Les niveaux de qualité sont définis et exigés par la loi et par les autorités, qui surveillent l'exploitation des réseaux de distribution et de transport d'électricité.

L'industrie de l'électricité au Québec est en pleine transition. Plutôt que de simplement consommer de l'électricité, les clients de demain pourront la produire, la stocker et la revendre, passant ainsi de consommateurs à "prosommateurs". Dans ce contexte, il est nécessaire de travailler sur des systèmes innovants de gestion de l'énergie domestique compatibles avec le futur système électrique. La solution reposera sur trois piliers principaux : les clients, les assets et le système électrique de demain. Dans la nouvelle ère d'électrification du Québec, les clients peuvent miser sur la décarbonisation, les énergies renouvelables et les véhicules électriques. En tant que pierres angulaires, les installations et les infrastructures doivent évoluer pour intégrer les nouvelles technologies, notamment la connectivité intelligente, les fonctionnalités avancées et les solutions adaptatives. S'appuyant sur les technologies numériques, l'automatisation

et l'intelligence artificielle, ces évolutions jetteront les bases du réseau intelligent intégré et flexible du futur. Ce réseau, capable de s'appuyer sur des données massives, assurera un suivi en temps réel des installations et des équipements chez les clients et interagira aussi avec les utilisateurs. Par conséquent, les systèmes conventionnels de gestion de l'énergie ne pourront pas être utilisés dans le futur réseau et il est nécessaire de concevoir des systèmes HEMS innovants et modernes. Les HEMS conventionnels ne peuvent pas offrir les avantages fournis par ceux qui sont coordonnés et la coordination des HEMS utilise généralement un cadre décisionnel distribué. Donc, la gestion coordonnée de l'énergie est devenue un point chaud de la recherche pour la conception du futur réseau intelligent. Également, pour atténuer les problèmes du réseau local à différents niveaux du système de distribution électrique, il est nécessaire d'envisager une coordination transactionnelle et hiérarchique des systèmes HEMS.

1.3 Hypothèses

Dans ce travail, nous supposons qu'un voisinage dans le système de distribution comprend un groupe de résidences homogènes (dans le sens du type et caractéristiques thermiques globales) et munis d'un gestionnaire énergétique rationnel qui fournit de réponses basées sur leur vraies préférences (crédibles) des utilisateurs. Le coordinateur envoie de l'information à tous les agents participants de manière juste et non biaisée. Ainsi, il n'y a pas d'agents qui ont

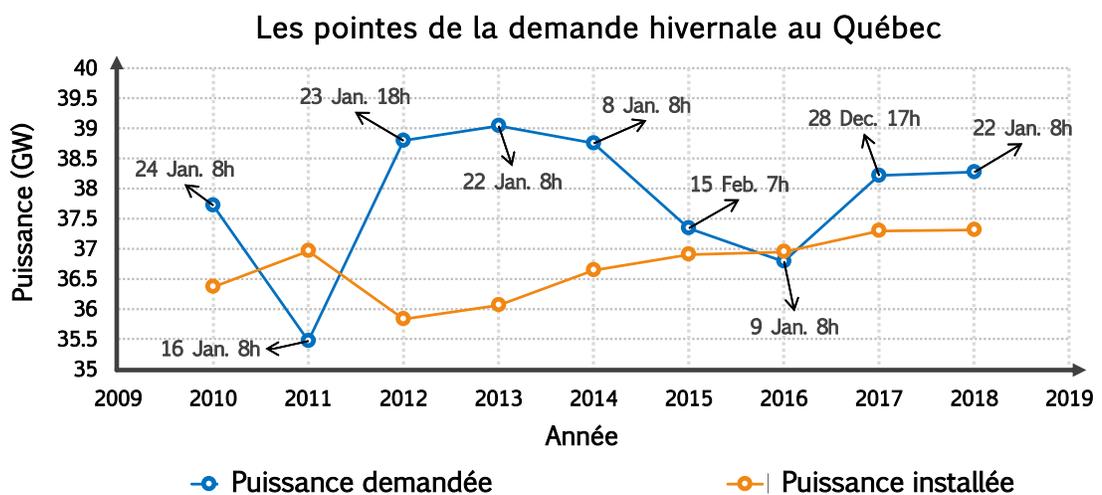


FIGURE 1-14 Puissance installée par Hydro-Québec et besoins de puissance en période de pointe [43]-[51].

plus d'information que les autres, ainsi ils ne connaissent pas les actions ou décisions d'autres agents participants. Nous supposons également que les négociations entre le coordinateur et l'agrégateur (fournisseur d'électricité) sont achevées et qu'un accord a été obtenu sur le prix de l'électricité et le taux d'incitation. Dans ce travail, nous n'avons pas pris en compte les incertitudes au cours du processus de prise de décision, et nous supposons que le processus est déterministe. Dans cette thèse, le système de gestion de l'énergie proposé est appliqué pour résoudre les problèmes du système électrique dans les régions froides comme le Québec. Enfin, dans cette recherche, il est supposé qu'il existe un marché monopolistique.

1.4 Problématique de thèse

La demande croissante d'énergie et le besoin urgent de réduire les émissions de carbone ont conduit à un intérêt croissant pour la réponse à la demande et les systèmes de gestion de l'énergie domestique qui permettent aux ménages de participer à des programmes de réponse à la demande [19], [52]. En général, la réduction ou le déplacement de la consommation d'électricité des ménages pendant les heures de pointe en réponse aux prix de l'électricité ou aux incitations, appelée réponse à la demande, est reconnue comme une stratégie pratique de gestion de la demande de pointe.

Malgré les avantages du programme de réponse à la demande, il est rapporté (dans [16]) que le système de distribution fait face à des pics de rebond, des instabilités et des contingences en raison de la forte pénétration des HEMS non coordonnés. Par conséquent, il est nécessaire de coordonner les HEMS dans le réseau de distribution pour satisfaire à la fois les objectifs individuels des utilisateurs (tels que minimiser la facture et maximiser le confort) et servir le réseau en atteignant des objectifs de groupe qui permettent de relever ses défis. L'agrégateur ou le fournisseur d'électricité peut déterminer les objectifs du groupe afin d'atténuer les problèmes tels que les pointes de demande. Il est nécessaire de trouver un équilibre entre le consensus des HEMS pour résoudre les problèmes du réseau et les incitations appropriées pour les participants à la coordination. Un nouvel algorithme de coordination transactionnelle doit donc être développé.

Après la coordination d'un groupe résidentiel, le problème suivant est de savoir comment répartir équitablement le gain total (l'incitation totale du groupe) entre les participants. Il est

donc nécessaire de concevoir un mécanisme permettant de mesurer la contribution de chaque client et de distribuer le gain total du groupe en conséquence. Un autre défi à relever au cours du processus de coordination est de garantir la véracité des informations et la compatibilité des incitations des mécanismes de participation déployés.

Un autre problème est que la coordination dans un groupe résidentiel n'est pas suffisante pour atténuer les problèmes à différents niveaux du système de distribution. En fait, il est nécessaire de développer une coordination hiérarchique des groupes de HEMS afin d'étendre le concept de coordination à tous les niveaux du système. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de concevoir un système de coordination multi-niveaux avancée. Pour ce faire, il est nécessaire de coordonner au moins l'entité liée au réseau (société) au niveau supérieur (le coordinateur du réseau) et les groupes résidentiels locaux au niveau inférieur. Le coordinateur de niveau supérieur tente de coordonner les coordinateurs de niveau inférieur qui gèrent les maisons intelligentes dans différents groupes. Sur les marchés futurs, les groupes résidentiels agissent en tant que parties prenantes et ont besoin d'être coordonnés pour augmenter leurs gains. Par conséquent, il est nécessaire de concevoir un cadre de coordination transactionnelle et hiérarchique pour coordonner efficacement ces groupes. À cet égard, la coordination hiérarchique des HEMS gère les profils énergétiques de la société, des groupes résidentiels et des ménages pour relever les défis à différents niveaux de la hiérarchie. La satisfaction des contraintes couplées et le grand nombre de calculs au sein d'une entité centrale sont les autres obstacles à surmonter. Le respect des contraintes couplées, telles que la capacité maximale du transformateur aux niveaux supérieurs, nécessite une coordination hiérarchique et un mécanisme de partage des contraintes pour les transférer aux consommateurs au niveau le plus bas. Ensuite, les clients considèrent les contraintes partagées dans leur processus de prise de décision. La coordination hiérarchique réduit le nombre de calculs aux niveaux supérieurs.

Finalement, dans les régions froides, la coordination hiérarchique peut jouer un rôle important dans la gestion des chauffages électriques, qui représentent la part la plus significative de la consommation d'électricité, afin de respecter les contraintes du système de distribution dans ses différentes étapes. Par conséquent, il est nécessaire de considérer la coordination hiérarchique des HEMS avec les thermostats résidentiels à réponse à la demande dans le réseau de distribution.

1.5 Objectifs et contributions

L'objectif général de cette thèse est de développer une approche pour la coordination transactionnelle des agents de gestion de l'énergie domestique capables de gérer efficacement et localement les ressources énergétiques distribuées des clients afin de réduire leurs factures d'électricité et d'améliorer leur participation à l'atténuation des défis du réseau local, sans compromettre leurs préférences. On suppose que la coordination transactionnelle est mise en œuvre par le biais d'un marché monopolistique.

1.5.1 Objectifs spécifiques :

Les objectifs spécifiques du projet de recherche peuvent être définis comme suit :

1. Développer un modèle de système multi-agents d'unités de gestion de l'énergie domestique gérant les ressources énergétiques distribuées et les préférences des consommateurs. Le modèle représente les interactions des agents pour parvenir à un consensus global et au partage des objectifs/données (variables globales/duelles) entre eux par le biais d'une coordination.
2. Concevoir un algorithme pour la coordination transactionnelle des systèmes de gestion de l'énergie domestique. Cet algorithme doit encourager les ménages à participer à la coordination, partager les objectifs communs entre les agents, établir un programme de réponse à la demande compatible avec les incitations, mesurer les contributions des agents et, en conséquence, distribuer équitablement le gain total. La coordination devrait également être développée de forme hiérarchique.
3. Évaluer des performances des approches proposées et comparaison avec des méthodes de l'état de l'art.

1.5.2 Contributions :

Les principales contributions sont les suivantes :

1. Conception d'une nouvelle approche décisionnelle distribuée et complémentaire pour la coordination transactionnelle des agents du système de gestion de l'énergie domestique

dans un groupe résidentiel. Cette approche forme un consensus entre les agents et distribue les objectifs partagés entre eux.

2. Développement d'un algorithme de coordination hiérarchique pour former une coordination entre plusieurs groupes résidentiels et lier la procédure de prise de décision au niveau le plus bas (utilisateurs) aux objectifs partagés et aux contraintes couplées du niveau le plus élevé (coordinateur du réseau).
3. Développement d'un mécanisme de partage des gains qui mesure les contributions des consommateurs à la coordination et distribue le gain total entre eux en se basant sur leurs contributions marginales de manière équitable.

1.6 Méthodologie de recherche

Les étapes suivantes résument la méthodologie de recherche adoptée pour résoudre le problème posé.

1. Revue de la littérature sur les algorithmes de gestion de l'énergie domestique dans le secteur résidentiel. Mise à jour continue de l'état de l'art sur les stratégies de gestion utilisées dans la littérature. Aussi, revue bibliographique sur les approches de coordination et les topologies de coordination propres à l'implémentation des HEMS coordonnés dans le secteur résidentiel.
2. Formulation du problème posé sous forme de problème d'optimisation mathématique. Tout d'abord, le problème a été formulé sous la forme d'un problème d'optimisation centralisé. Ensuite, nous reformulons le problème sous la forme d'un problème d'optimisation distribuée pour les cas de coordination uni-niveau et multi-niveau (hiérarchique).
3. Modélisation des consommations énergétiques d'un voisinage en intégrant les modèles de systèmes de chauffage électrique. Dans cette étude, nous avons construit le modèle thermique des maisons en utilisant des données expérimentales. Chaque ménage est équipée de plinthes chauffantes régies par des thermostats à base de dérivée intégrale proportionnelle. La température intérieure, la température extérieure et la consommation

énergétique des chauffages ont été mesurées et enregistrées. La technique de régression ridge a été employée pour estimer les paramètres thermiques. Par ailleurs, les préférences stochastiques des ménages, telles que les niveaux de confort, les occupations, les points de consigne et les plages acceptables de température intérieure, ont été modélisées à l'aide de données expérimentales provenant de consommateurs du Québec.

4. Proposition et mise en œuvre d'une coordination transactionnelle des systèmes de gestion de l'énergie domestique pour le contrôle des charges dans un voisinage en tenant compte des objectifs individuels et communs ;
5. Proposition d'une politique de paiement incitative pour donner la récompense correspondante en fonction du niveau de coordination dans le voisinage pour suivre les objectifs des fournisseurs d'électricité. Ensuite, proposition d'une approche pour partager équitablement les récompenses gagnées par le groupe entre les agents en fonction de leur effort dans coordination ;
6. Proposition d'une coordination hiérarchique des systèmes de gestion de l'énergie domestique pour le contrôle des charges dans une société comprenant plusieurs groupes considérant les objectifs individuels et communs dans des accords «gagnant-gagnant». La proposition d'une approche permettant de partager équitablement les gains de la société entre les consommateurs ;
7. Validation et évaluation des performances des algorithmes proposés par simulation, et leur comparaison avec des approches bien connues.

La Figure 1-15 donne un aperçu de la méthodologie de recherche adoptée.

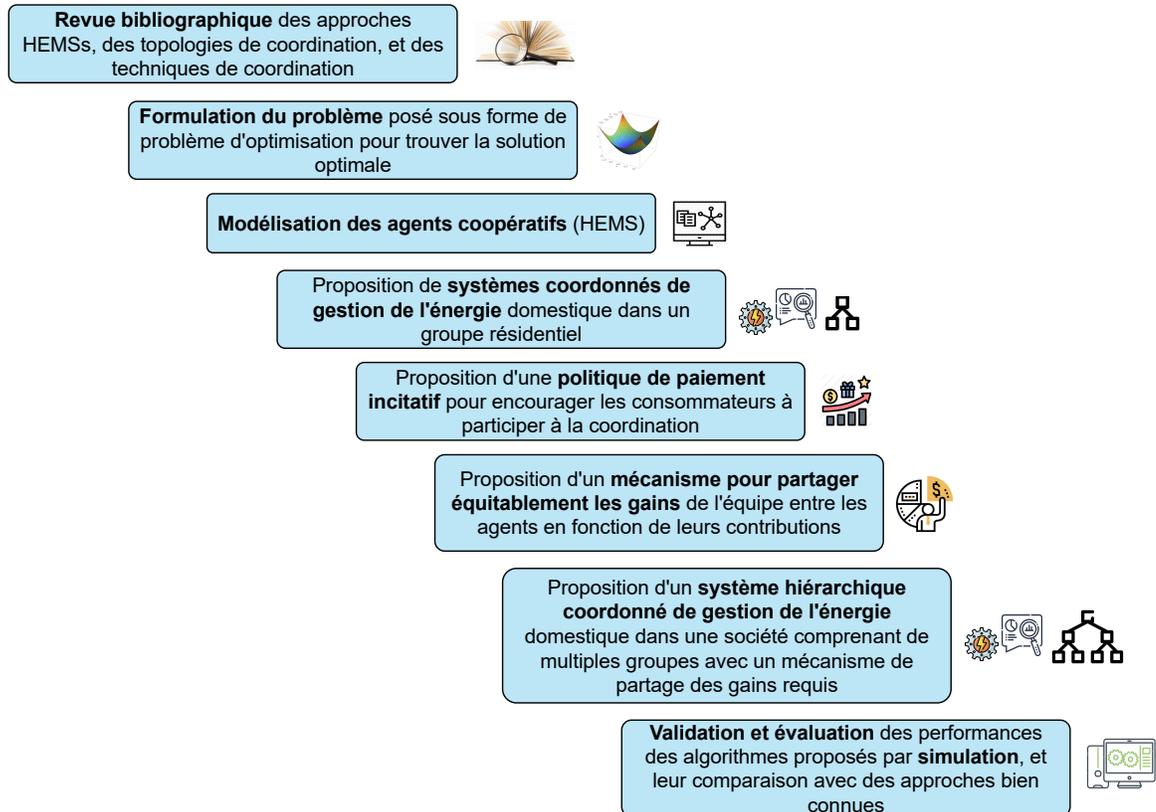


FIGURE 1-15 Aperçu global de la méthodologie de recherche.

1.7 Infrastructure de recherche

Toutes les ressources informatiques et d'électronique pour les études de modélisation, sont fournies par le Laboratoire d'Innovation et de Recherche en Énergie Intelligente (LIREI) de l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène et par le Département de Génie Électrique et Informatique de l'Université du Québec à Trois-Rivières.

Cette thèse a été réalisée en collaboration avec le Laboratoire des Technologies de l'Énergie (LTE) d'Hydro-Québec, et plusieurs bases de données fournies par le LTE ont été utilisées pour les différentes analyses de ce projet. Des mesures ont été réalisées dans des bâtiments résidentiels du Québec afin d'obtenir certaines informations utiles à la validation des modèles, notamment les systèmes de chauffage, le chauffe-eau électrique, les systèmes de stockage et les charges de base.

1.8 Structure de la thèse

Cette thèse est composée de 6 chapitres :

- **Chapitre 1** : Ce chapitre présente l'introduction de la recherche, y compris le contexte général, le contexte spécifique, les hypothèses, les problèmes de recherche, les objectifs/contributions de la recherche, la méthodologie de la recherche, l'infrastructure de la recherche et la structure de la thèse.
- **Chapitre 2** : Ce chapitre présente une revue de la littérature sur les systèmes de gestion de l'énergie conventionnels, les étapes nécessaires à la mise en place d'une coordination, les topologies de coordination, les approches de coordination à un niveau et les méthodes de coordination hiérarchique. En outre, ce chapitre compare nos contributions avec les travaux existants dans la littérature.
- **Chapitre 3** : Ce chapitre propose une approche de coordination des HEMS dans un groupe résidentiel afin de parvenir à un consensus entre les ménages tout en respectant leurs objectifs/préférences/contraintes individuels et en répartissant les objectifs partagés entre eux. Un mécanisme de partage des gains est présenté pour mesurer les contributions des consommateurs et distribuer le gain total entre eux. En plus, le chapitre conçoit un mécanisme compatible avec les incitations pour garantir la véracité des déclarations des agents.
- **Chapitre 4** : Ce chapitre développe l'approche de la coordination des HEMS dans un groupe résidentiel vers une topologie hiérarchique (multi-niveaux) incluant de multiples groupes. La coordination hiérarchique présentée dans ce chapitre modélise les accords locaux (groupe) et globaux (société). Le chapitre relie la prise de décision au niveau inférieur à la prise de décision au niveau supérieur afin de satisfaire les objectifs et les contraintes de niveau supérieur. Le chapitre présente également des mécanismes de partage des contraintes et des gains.
- **Chapitre 5** : Les études de cas et les données réelles utilisées pour créer des modèles permettant de simuler le comportement des consommateurs et la dynamique thermique

des maisons ont été décrites dans ce chapitre. Le chapitre présente des simulations pour tester la performance de l'approche de coordination proposée. Enfin, le chapitre présente les résultats et les discussions associées.

- **Chapitre 6** : Ce chapitre contient des conclusions et des résumés des constatations, des résultats et des discussions. Des idées de recherches futures pour développer et compléter le présent travail ont également été recommandées dans ce chapitre. Enfin, les publications extraites de cette thèse ont été listées.

Chapitre 2 - État de l'art

Ce chapitre passe en revue les dernières recherches sur la coordination des systèmes HEMS. Les étapes nécessaires à la mise en œuvre de ces systèmes, en tenant compte des topologies et des techniques de coordination, sont étudiées en détail. Cette exploration est principalement rapportée par la classification des approches de coordination en fonction de leur utilisation des algorithmes de décomposition. En outre, les principales caractéristiques, les avantages, et les désavantages des méthodes sont examinés. Ensuite, les applications spécifiques des conceptions de coordination sont discutées et classées par catégories. Grâce à une enquête exhaustive, ce chapitre élabore des remarques importantes sur les lacunes critiques des études existantes sur la coordination des HEMS.

2.1 Aperçu des recherches sur les EMSs coordonnés/non-coordonnés.

Plusieurs recherches ont été menées sur la coordination entre agents dans différents domaines tels que les mathématiques [53] et les systèmes électriques [9]. Plusieurs études ont également conçu des EMS non-coordonnés et coordonnés dans les réseaux intelligents. Le Tableau 2-1 présente un aperçu de ces études. En outre, de nombreux travaux sur les HEMS ont abordé des questions importantes liées aux différentes sources d'énergie, aux divers paramètres des incertitudes, aux différentes méthodes de planification, au confort des utilisateurs, aux modèles de charge et à la multi-objectivité. La Figure 2-1 donne un aperçu des modèles HEMS existants en les illustrant selon six classes principales. La Figure présente un aperçu des modèles existants de systèmes de gestion de l'énergie résidentielle tenant compte des différentes sources d'énergie, des modèles d'incertitude, des méthodes de planification, des modèles de confort de l'utilisateur, des modèles de charge et de la fonctionnalité multi-objectivité. Néanmoins, les HEMS non-coordonnés existants, en tant que concept opposé, ont

été examinés afin de clarifier davantage les opportunités et les défis des HEMS coordonnés.

La plupart des stratégies de gestion proposées dans la littérature sont basées sur le comportement non-coordonné des clients individuels, sans tenir compte des actions des autres agents. Dans la pratique, la prise en compte des actions des autres agents dans la prise de décision individuelle et la création d'une coordination entre les ménages peuvent permettre d'éviter les pics de rebond et de résoudre les problèmes spécifiques du voisinage ou des régions du système de distribution. Dans la stratégie de gestion coopérative de l'énergie, chaque consommateur apporte sa contribution (profil de charge) en fonction de sa flexibilité et des données fournies par le coordinateur qui partage les variables globales du groupe. Le coordinateur coordonne les agents pour atteindre les objectifs du groupe, par exemple l'aplatissement du profil agrégé, par la sommation de la contribution de tous les agents. Au contraire, la plupart des stratégies de gestion proposées dans la littérature essaient d'aplanir le profil de chaque client de manière indépendante pour aplanir le profil agrégé. Cependant, dans le concept de coordination, chaque agent modifie son comportement (sans nécessairement améliorer son facteur de charge), mais la somme des profils de tous les agents crée un profil agrégé aplati. Aussi, d'autres approches de gestion dans la littérature sont centralisées [54].

TABLEAU 2-1 Aperçu des recherches sur les EMS coordonnés/non-coordonnés.

Articles de recherche	Domaine d'étude	Coordonné	Non-coordonnés	Décentralisé	Centralisé	Applications de l'HEMS	Autres applications	Techniques basées sur la décomposition
[16]	Coordination des HEMS	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
[35]	Coordination des HEMS	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗
[24]	Coordination des HEMS	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
[30]	Planification du hub énergétique	✗	✓	✗	✓	✗	Pôles énergétiques	✗
[26]	Coordination des HEMS	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗
[55], [56]	Systèmes combinés d'électricité et de gaz naturel	✓	✗	✗	✓	✓	P2G	✗
[57]	Coordination des HEMS	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗
[58]	Commitment unitaire contraint multi-réseaux	✓	✗	✗	✓	✓	P2G	✗
[59], [60]	OPF coordonné	✓	✗	✓	✗	✗	OPF	✓
[17]	Planification du pôle énergétique	✓	✓	✓	✓	✓	Pôles énergétiques	✓
[61]	Coordination des HEMS	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓

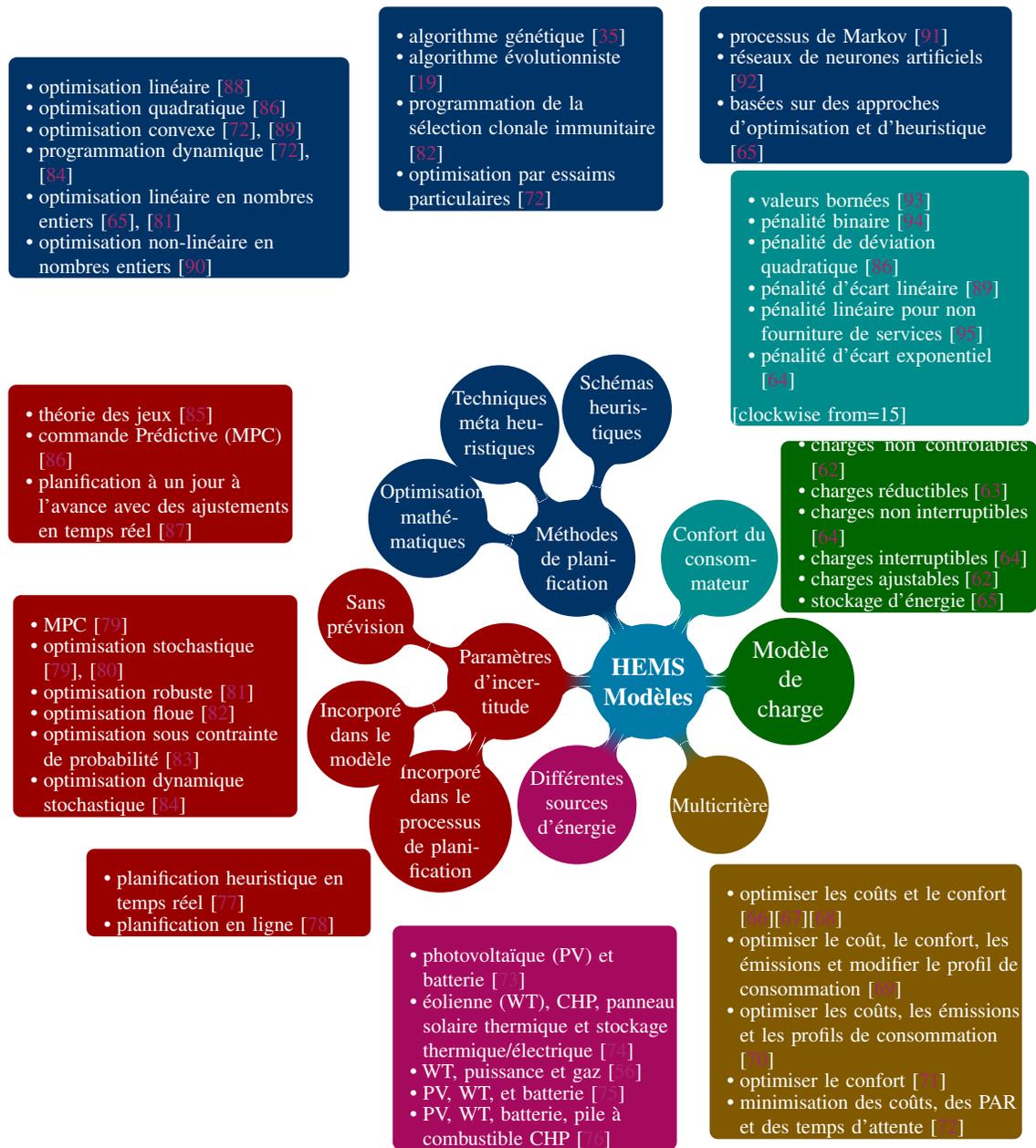


FIGURE 2-1 Aperçu des modèles existants de EMS résidentiel prenant en compte différentes sources d'énergie, différents modèles de paramètres des incertitudes, diverses méthodes de planification, des modèles de confort de l'utilisateur, différents modèles de charges et la fonctionnalité de multi-objectivité.

2.2 Les étapes de la coordination.

Sur la base de la littérature, les étapes nécessaires à la coordination entre SH sont résumées dans la Figure 2-2 [9]. La topologie de coordination définit comment les agents communiquent

entre eux, comment ils partagent les données dans une communauté et qui est responsable de la prise de décision. La technique de coordination explique comment les agents sont coordonnés et comment atteindre à la fois les objectifs du groupe et les objectifs individuels. La phase d'optimisation recherche une manière optimale de coordination les SH. Le DSM cible les techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique dans les SH. La DR vise à modifier le profil de charge du point de vue de l'agrégateur afin d'équilibrer la demande et l'offre [96]-[100].

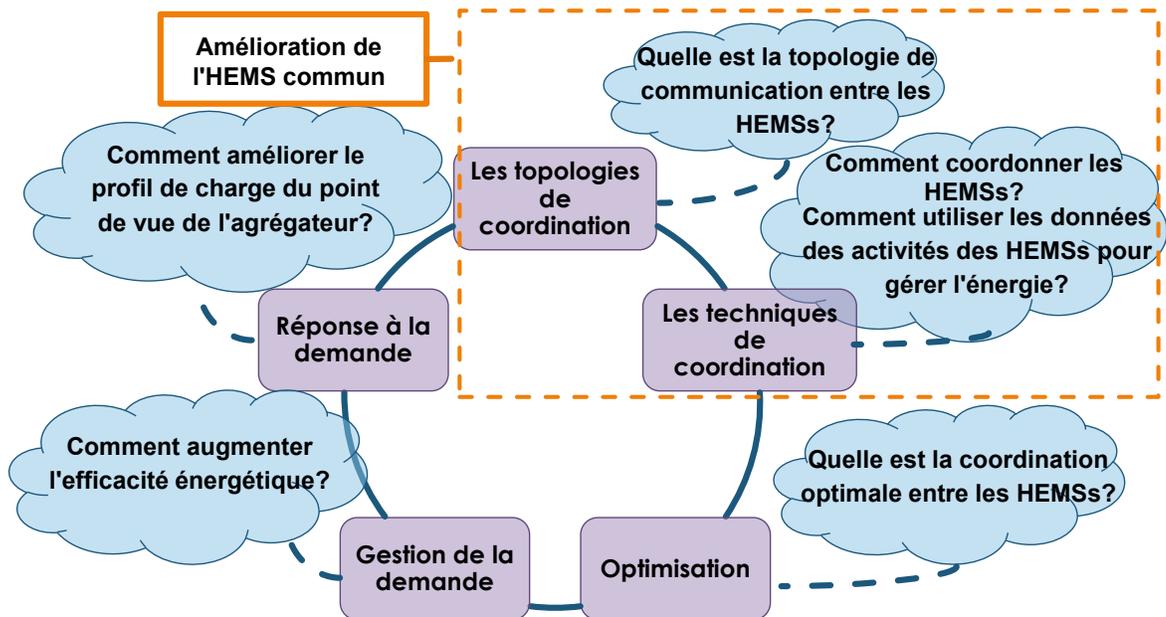


FIGURE 2-2 Étapes nécessaires pour la coordination des maisons intelligentes dans les voisinages. Les techniques de coordination et la topologie peuvent être utilisées pour améliorer les méthodes HEMS courantes.

2.2.1 Les topologies de coordination

Afin de coordonner les SH, la première étape consiste à choisir une topologie. La topologie clarifie la communication entre les acteurs (HEMS, coordinateur, agrégateur et fournisseur d'électricité) dans une zone de voisinage. En outre, elle détermine un système de contrôle centralisé ou décentralisé en termes de décideur. La topologie doit être compatible avec les réglementations des fournisseurs et l'architecture du voisinage. Les topologies de coordination peuvent être classées en sept catégories [9] : Centralisé, Distribué ou connexion en étoile (avec coordinateur), Décentralisé ou totalement distribué (sans coordinateur), Partiellement distribué

(avec coordinateur), Connexion en anneau, Connexion aléatoire, et Connexion désirée. La Figure 2-3 illustre l'architecture des topologies ainsi que leurs connexions et leurs décideurs. Il faut noter que le choix de la topologie peut affecter la technique de coordination utilisée, par exemple, son taux de convergence [101], [102]. En général, les topologies sont divisées en deux catégories : centralisée et décentralisée. En détail, les topologies sont divisées en sept catégories expliquées comme suit.

2.2.1.1 Centralisée

La topologie centralisée [9] a été représentée sur la Figure 2-3 (a). Dans cette topologie, le décideur est une entité centrale qui peut être le fournisseur d'électricité, l'agrégateur ou le coordinateur. [24], [73], [103]-[111]. Tous les clients envoient leurs informations sur le profil de consommation d'énergie, la production et les préférences à l'entité centrale. Les SH ne peuvent pas communiquer directement entre eux. Après la collecte des données, l'entité centrale résout le problème de coordination afin de coordonner les SH et de programmer les charges contrôlables. En outre, elle suggère le meilleur échange possible entre les prosommateurs et les consommateurs. En fait, ce commerce explique l'échange d'énergie entre les prosommateurs qui ont un surplus d'énergie provenant de leurs sources d'énergie renouvelable et les ménages qui ont besoin d'acheter plus d'énergie dans un voisinage. Dans [24], la coordination entre plusieurs SH a été étudiée. Les auteurs ont considéré les plans de planification de la journée à venir (day-ahead) des appareils contrôlables et le commerce d'électricité entre les ménages. Ils ont comparé le profil de charge agrégé sous quatre conditions différentes basées sur l'algorithme de base (sans utiliser de EMS), le EMS non-coordonnés, le EMS coordonné distribué et le EMS coordonné centralisé. Les auteurs de [73] ont utilisé une topologie centralisée pour coordonner les HEMS et minimiser la consommation électrique agrégée en tenant compte des contraintes du transformateur. Les SH ont été gérés pour échanger de l'électricité entre eux ou avec les fournisseurs. Solanki et al. [103] ont proposé un DR coordonné centralisé en utilisant la méthode de contrôle prédictif basé sur modèle pour un MG isolé.

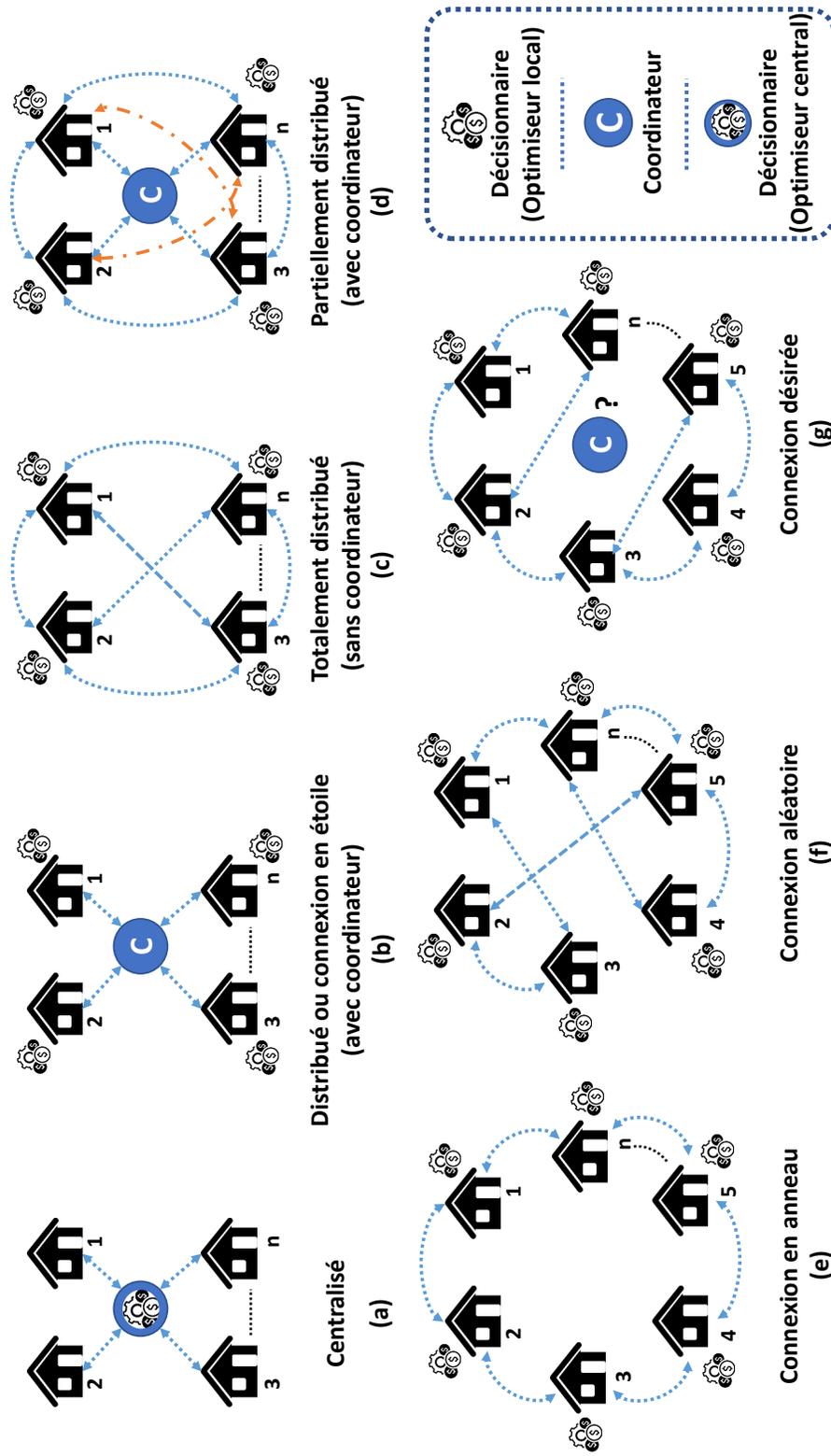


FIGURE 2-3 L'architecture des différentes topologies de coordination qui illustre les connexions entre les agents et détermine les décideurs.

2.2.1.2 Distribuée ou connexion en étoile (avec coordinateur)

Cette topologie est illustrée sur la Figure 2-3 (b). La configuration de connexion en étoile utilise un coordinateur plutôt qu'une entité centrale pour la prise de décision. Le coordinateur peut être soit l'agrégateur, soit un agent indépendant, soit l'un des SH du voisinage. Le coordinateur collecte les données de tous les clients. Dans cette topologie, les HEMS ne peuvent pas communiquer directement entre eux. Chaque HEMS gère son propre problème local afin de programmer ses charges contrôlables et de trouver le meilleur échange possible avec les autres HEMS du même voisinage. Ensuite, chaque HEMS envoie les résultats au coordinateur. Par la suite, le coordinateur renvoie les données aux agents et conduit ces agents vers la coordination. Ce type de topologie présente la coordination de voisinage la plus compatible avec le système de distribution d'énergie puisque la disposition du voisinage est similaire à une connexion en étoile. Dans cette topologie, un agent au niveau du transformateur peut être considéré comme le coordinateur. La topologie distribuée est robuste car son système de coordination peut fonctionner à un point optimal après la perte de plusieurs agents. Les techniques de consensus ADMM et ALADIN ¹ sont les meilleures options pour traiter un problème de coordination dans la topologie distribuée [9]. Les applications de la topologie distribuée ont été étudiées dans différentes recherches. Celik et al. [35] ont utilisé la topologie distribuée pour coordonner les HEMS dans un voisinage. Un DSM de jour à l'avance a été étudié par la coordination décentralisée entre les SH avec le commerce de l'électricité, les RES, et les ESS. Un système multi-agents (MAS) a été utilisé pour modéliser les SH, l'agrégateur (coordinateur) et le fournisseur comme des agents. Les résultats ont montré une réduction des coûts de 3,35%. Dans [61], une connexion en étoile a été utilisée pour modéliser un réseau intelligent avec des SH, ESS, RESs, et EVs. Un algorithme basé sur ADMM a été appliqué pour coordonner les SH afin d'aplanir le profil de charge agrégé. Tous les SH ont envoyé leurs données uniquement au coordinateur pour des raisons de confidentialité. Ensuite, le coordinateur a partagé de nouvelles variables globales avec tous les SH.

1. Lagrangien augmenté direction alternée newton inexact en anglais "Augmented Lagrangian Alternating Direction Inexact Newton" en abrégation "ALADIN"

2.2.1.3 *Décentralisée ou totalement distribuée (sans coordinateur)*

Ce type de topologie a été représenté sur la Figure 2-3 (c). La topologie totalement distribuée n'emploie ni entité centrale ni coordinateur. Par conséquent, tous les SH communiquent directement entre eux et partagent leurs informations avec d'autres voisins. En outre, chaque SH gère localement les charges planifiables et échange de l'énergie. Cette topologie peut être inappropriée pour certains voisinages dans les systèmes de distribution d'énergie en raison des réglementations sur la confidentialité et des connexions directes entre les ménages. La topologie entièrement distribuée est robuste car elle peut maintenir un fonctionnement optimal en cas de perte de plusieurs agents. Cette topologie n'emploie pas de coordinateur, ce qui augmente la robustesse. Pour mettre en œuvre la coordination des HEMS par la topologie entièrement distribuée, les algorithmes basés sur APP¹, PMP², C+I³, et OCD⁴ sont recommandés [9]. Dans [112], une approche de coordination totalement décentralisée pour le flux de puissance optimal (OPF⁵) dans un réseau électrique a été suggérée. La méthode proposée est robuste et réalisable pour le fonctionnement en temps réel du réseau. L'OPF suggéré a coordonné les agents dans le réseau par la topologie totalement distribuée. Le PMP a été utilisé pour gérer le problème de coordination. Les agents du réseau ont échangé une quantité limitée de données. Le système développé a donné un énorme problème de coordination avec plus d'un million de variables. Cependant, l'erreur et le taux de convergence sont tout à fait acceptables.

2.2.1.4 *Partiellement distribuée (avec coordinateur)*

La Figure 2-3 (d) montre une topologie de coordination partiellement distribuée. Cette topologie n'utilise pas d'entité centrale pour prendre des décisions. Cependant, elle peut profiter d'un coordinateur. Une entité indépendante ou l'un des agents peut faire office de coordinateur. Ce type de topologie est une combinaison de la topologie totalement distribuée et de la topologie de connexion en étoile. La communication de pair à pair entre les SH est utilisée dans cette configuration. En outre, tous les SH communiquent directement avec le

-
1. Principe du problème auxiliaire en anglais "Auxiliary Problem Principle" en abrégé "APP"
 2. Passage des messages proximaux en anglais "Proximal Message Passing" en abrégé "PMP"
 3. en anglais "Consensus + Innovations" en abrégé "C+I"
 4. Décomposition des conditions d'optimalité en anglais "Optimality Condition Decomposition" en abrégé "OCD"
 5. en anglais "optimal power flow" en abrégé "OPF"

coordinateur. Le EMS de chaque SH (planification et commerce) est exécuté localement. Dans cette topologie, le problème de coordination peut être mis en œuvre en utilisant des méthodes de coordination basées sur ADMM, ALADIN, APP, PMP, C+I, et OCD [9]. Les HEMS transmettent leurs décisions aux autres voisins et au coordinateur. Cette topologie peut être inappropriée pour certains voisinages du réseau de distribution d'électricité en raison des réglementations sur la confidentialité et de la connexion directe entre les agents. Cependant, la topologie partiellement distribuée est robuste puisqu'elle peut conserver un fonctionnement optimal après la perte de plusieurs agents. La publication [113] a examiné une planification coordonnée de la consommation d'énergie résidentielle en utilisant la topologie partiellement distribuée. L'approche proposée utilise la dual decomposition pour décomposer le problème, trouver l'équilibre de Nash pour chaque sous-problème, et coordonner les agents. Dans la méthode proposée, un des consommateurs agit en tant que coordinateur et échange des données de voisinage avec le fournisseur d'électricité.

2.2.1.5 Connexion en anneau

La Figure 2-3 (e) présente la topologie de connexion en anneau. Cette topologie n'utilise pas de coordinateur indépendant, mais deux voisins adjacents échangent des informations entre eux. Les problèmes d'optimisation locale sont résolus dans chaque HEMS en utilisant les informations données par la ligne de communication. Une défaillance du SH dans la communication conduit à une condition de fonctionnement non optimale [101], [102].

2.2.1.6 Connexion aléatoire

Cette topologie a été représentée sur la Figure 2-3 (f). Dans la topologie aléatoire, la connexion/communication entre les agents varie en fonction du temps [101], [102]. Cette topologie peut être utilisée pour les applications qui nécessitent une ligne de communication variant dans le temps.

2.2.1.7 Connexion désirée

La Figure 2-3 (g) illustre la topologie de la connexion désirée (par fournisseur d'électricité). Dans cette topologie, la connexion et le décideur sont conçus en fonction des exigences et de

l'architecture du voisinage.

2.2.1.8 *Discussions et conclusions*

Selon la discussion ci-dessus, une topologie centralisée n'est pas appropriée pour la coordination des HEMS dans les futurs voisinages intelligents. La coordination distribuée des HEMS présente plusieurs avantages par rapport à la coordination centralisée. Dans la topologie distribuée, les agents partagent une quantité limitée de données avec d'autres entités (comme le coordinateur ou l'agrégateur). Cela permet de réduire les coûts des infrastructures de communication nécessaires. En outre, cela simplifie les calculs et augmente la vitesse de processeur. Par conséquent, cela peut permettre de traiter un problème plus grand. Une topologie distribuée peut conduire à une coordination robuste entre les HEMS puisque la défaillance d'un agent individuel peut être récupérée par les autres agents pour garantir un fonctionnement correct et optimal. En effet, dans le cas centralisé, si l'entité centrale tombe en panne, le fonctionnement optimal du voisinage peut être mis en péril. La coordination distribuée des HEMS satisfait aux exigences de confidentialité des données et aux normes de cybersécurité [114]. La réalisation des caractéristiques de topologie distribuée susmentionnées est réalisable puisque plusieurs processeurs peuvent être utilisés en parallèle pour traiter le problème de coordination. Les avantages et les inconvénients des topologies de coordination sont résumés dans le Tableau 2-2.

2.2.2 *Méthodes de coordination*

Cette section étudie la coordination entre les SH sur la base des approches qui ont été proposées dans la littérature. Ces méthodes peuvent être séparées en fonction de leur utilisation des techniques de décomposition : Méthodes basées sur la décomposition et la non-décomposition [9].

2.2.2.1 *Méthodes de coordination basées sur le principe de décomposition*

Les méthodes de coordination des HEMS peuvent utiliser le concept de décomposition et ainsi, décomposer leur grand et complexe problème en plusieurs sous-problèmes. Chaque sous-problème peut être résolu localement par un agent. En fait, ces méthodes réalisent la

TABLEAU 2-2 Les avantages et les inconvénients des topologies de coordination.

Catégories	PROS	CONS
Centralisé	<ul style="list-style-type: none"> i) le décisionnaire est le fournisseur ou l'agrégateur ii) communication directe entre les consommateurs et les fournisseurs d'électricité iii) pas besoin d'un processus itératif 	<ul style="list-style-type: none"> i) une grande quantité de calculs dans un seul processeur ii) partager un grand nombre de données avec une forte charge de communication iii) la scalabilité est limitée iv) vulnérable contre les défaillances des individus v) un temps de traitement considérable vi) vulnérable aux cyberattaques vii) le partage de données personnelles avec des fournisseurs
Distribué	<ul style="list-style-type: none"> i) petite quantité de calculs dans plusieurs processeurs ii) partager une petite quantité de données iii) compatible avec la structure des voisinages existants iv) robuste contre les défaillances individuelles v) temps de traitement approprié vi) le décisionnaire est chaque maison vii) satisfait aux normes de confidentialité des données et de cybersécurité viii) extensible avec une faible charge de communication 	<ul style="list-style-type: none"> i) besoin d'un coordinateur pour le partage des données entre les SH ii) processus itératif entre les SH et le coordinateur iii) partage des données personnelles avec le coordinateur
Totalement distribué	<ul style="list-style-type: none"> i) petite quantité de calculs dans plusieurs processeurs ii) partager une petite quantité de données iii) robuste contre les défaillances individuelles iv) temps de traitement approprié v) le décisionnaire est chaque maison vi) respecter les normes en matière de confidentialité des données et de cybersécurité vii) faible charge de communication viii) pas besoin d'un coordinateur pour le partage des données 	<ul style="list-style-type: none"> i) communication directe entre un petit groupe de SH ii) processus itératif entre SH iii) partage des données personnelles avec un petit groupe de SH
Partiellement distribué	<ul style="list-style-type: none"> i) petite quantité de calculs dans plusieurs processeurs ii) partager une petite quantité de données iii) robuste contre les défaillances individuelles iv) le décideur est chaque maison 	<ul style="list-style-type: none"> i) communication entre les SH ensemble et / ou le coordinateur ii) nécessitent un processus itératif iii) le partage des données personnelles avec le coordinateur et les autres SH iv) nécessité d'un coordinateur pour partager une partie des données
Connexion radiale	<ul style="list-style-type: none"> i) partager une petite quantité de données avec les voisins adjacents ii) pas besoin de coordinateur iii) le décisionnaire est chaque maison 	<ul style="list-style-type: none"> i) communication directe entre voisins adjacents ii) Processus au tour par tour et processus lent entre SH iii) vulnérable contre les défaillances des individus
Connexion aléatoire	<ul style="list-style-type: none"> i) utile pour les communications variant dans le temps 	<ul style="list-style-type: none"> i) mise en œuvre complexe et coûteuse
Connexion désirée	<ul style="list-style-type: none"> i) appropriées pour des applications spécifiques 	<ul style="list-style-type: none"> i) peuvent ne pas suivre les standards communs

coordination entre les agents en calculant des variables de couplage et des variables globales. La première variable est utilisée pour la décomposition tandis que la seconde est utilisée pour la coordination. Les données requises peuvent être partagées soit par le coordinateur, soit par une communication directe de pair à pair, soit par une topologie de communication appropriée entre les agents. Cette section présente un aperçu des méthodes de coordination basées sur la décomposition, qui peuvent être utilisées pour coordonner les SH. Les plus importantes techniques de coordination basées sur la décomposition dans la littérature (dans les domaines des mathématiques, de l'apprentissage automatique et des systèmes électriques) sont les suivantes : ADMM, C-ADMM, VS-ADMM, GS-ADMM, J-ADMM, PJ-ADMM, Dual Decomposition, ALADIN, ATC, APP, PMP, OCD, C+I [9]. Les approches de coordination des HEMS peuvent être conçues et développées sur la base de ces algorithmes. Pour plus de détails sur chaque algorithme et les équations correspondantes, voir [9]. Le résumé des principales caractéristiques des approches de coordination des HEMS basées à la décomposition a été présenté dans le Tableau 2-3. Les auteurs de [115] ont proposé un schéma de planification décentralisé basé sur une décomposition duale pour coordonner la charge de EV rechargeables hétérogènes. La recherche [116] a examiné l'OPF distribué basé sur ADMM. Le travail [117] a comparé trois algorithmes différents basés sur C-ADMM pour le DC-OPF dynamique coordonné dans le contexte d'un programme de DR. Les auteurs de [118] ont comparé deux programmes coordonnés de DR basés sur VS-ADMM et PJ-ADMM. La publication [119] a montré l'efficacité des approches basées sur GS-ADMM pour coordonner les agents. Un OPF coordonné basé sur J-ADMM a été suggéré par [119] qui peut être utilisé pour coordonner les SH. L'étude [60] a utilisé l'algorithme d'ALADIN pour coordonner les agents dans un AC-OPF non convexe et non linéaire. Le travail [120] a coordonné les opérations à long terme des régions dans un réseau électrique multirégional interconnecté en utilisant l'ATC. La recherche [121] a développé une méthode basée sur l'APP pour la coordination d'agents dans un problème d'OPF. L'article [122] a proposé un algorithme de coordination basé sur le PMP pour résoudre un problème OPF sous contrainte de sécurité dans un réseau électrique. La publication [123] a suggéré un schéma d'OPF contraint par la stabilité en transition basé sur l'OCD.

En résumé, le C-ADMM est un choix approprié pour la décomposition d'un problème

d'optimisation avec un grand nombre d'agents en plusieurs sous-problèmes et pour le résoudre de manière distribuée en utilisant un coordinateur pour le partage d'informations (variables globales). Il crée un consensus entre les HEMS, possède de puissantes propriétés de convergence et permet de résoudre les problèmes de manière plus efficace.

2.2.2.2 *Méthodes de coordination non basées sur le principe de décomposition*

Dans la littérature, certains articles ont proposé des approches de coordination basées sur la non-décomposition qui peuvent être utilisées pour la coordination des HEMS. Ces approches sont généralement mises en œuvre en utilisant la théorie des jeux, les systèmes multi-agents ou l'optimisation multi-objectifs. Par exemple, Fan et al. [17] ont présenté une programmation économique coordonnée pour une communauté avec plusieurs centres énergétiques en termes de jeu de marchandage coordonné. Un équilibre optimal de Pareto a été utilisé pour obtenir une négociation équitable entre tous les centres d'énergie. La publication [35] a suggéré un système multi-agents pour la coordination des HEMS dans un voisinage. Les auteurs de [72] ont proposé des modèles à un seul/multi objectif pour la planification coordonnée/non-coordonnée des appareils à l'avance et en temps réel. Pour d'autres exemples, voir [9]

2.2.2.3 *Résumé des méthodes de coordination*

Notre étude démontre que les techniques de coordination basées sur une topologie de connexion en étoile (distribuée) sont les mieux adaptées à l'architecture actuelle des zones de voisinage dans les réseaux électriques en ce qui concerne les mises en œuvre actuelles de la coordination HEMS. Ces techniques de coordination sont des choix appropriés, en particulier au niveau le plus bas des systèmes de distribution où un groupe de résidences est connecté à un transformateur résidentiel. En effet, dans les techniques de coordination basées sur la topologie distribuée, le coordinateur peut être situé au niveau du transformateur résidentiel. Les algorithmes tels que C-ADMM [135] et ALADIN [60] sont compétents pour concevoir et développer un système de coordination des HEMS avec une topologie de connexion en étoile .

TABLEAU 2-3 Le sommaire des principales caractéristiques des approches de coordination des HEMS basées sur la décomposition.

Technique de coordination des HEMS basée sur	Topologie de voisinage	Coordinateur extérieur	Calcul des HEMS à chaque étape	Échanger des données	Vitesse	Nombre d'agents	Détails supplémentaires
Dual Decomposition [53]	distribué	oui	moyen	faible	lent	2 >	i) décomposabilité, ii) mauvaises propriétés de convergence, iii) vitesse faible
ADMM [53]	distribué	oui	élevé	faible	moyen	2	i) décomposabilité, ii) convergence puissante, iii) sensible aux paramètres d'ajustement, iv) objectifs convexes
C-ADMM [117], [119]	distribué	oui	faible	faible	rapide	2 >	i) consensus entre les HEMS, ii) puissantes propriétés de convergence
J-ADMM [119], [124]	distribué	oui	moyen	faible	moyen	2 >	i) faibles propriétés de convergence ii) HEMS travaillant en parallèle
PJ-ADMM [118], [124], [125]	distribué	oui	moyen	faible	rapide	2 >	i) objectifs à convexité non-stricte, ii) amélioration de la convergence des algorithmes
GS-ADMM [119]	distribué	oui	élevé	faible	moyen	2 >	i) convergence faible pour $N > 3$, ii) HEMS travaillant de manière séquentielle
VS-ADMM [118], [124]	distribué	oui	très élevé	moyen	lent	2 >	i) augmentation du nombre de variables et de contraintes, ii) vitesse faible
ALADIN [60], [126], [127]	distribué	oui	faible	faible	rapide	2 >	i) propre pour les problèmes de coordination non convexes, ii) diminuant le nombre d'itérations, iii) conduisant à une plus grande précision
ATC [128], [129]	distribué	oui	élevé	faible	moyen	2 >	i) haut niveau de flexibilité, ii) structure hiérarchique
OCD [123], [130], [131]	décentralisé	non	élevé	moyen	moyen	2 >	i) fonction de coût non-convexe, ii) fonctions de coût différentiables, iii) conditions de convergence compliquées
APP [59], [88], [132]	décentralisé	non	élevé	faible	moyen	2	i) garantir la convergence de l'algorithme et la cohérence entre les HEMS, ii) sensible aux paramètres de réglage
C+I [133]	décentralisé	non	moyen	élevé	moyen	2 >	i) suivi direct du consensus des HEMS, ii) robuste contre les perturbations, iii) grande quantité de données échangées entre voisins, iv) vitesse faible
PMP [112], [134]	décentralisé	non	moyen	élevé	moyen	2 >	i) modélisation du problème de coordination en réseaux contenant des agents associés, ii) mise à jour du taux de convergence en ligne, iii) grande quantité de données échangées, iv) faible vitesse, v) extensible

2.3 Travaux précédents associés dans la littérature

2.3.1 Coordination des HEMS en un seul groupe

La coordination des utilisateurs finaux peut être classée en coordination directe ou indirecte. Des exemples de cadres de coordination directe et indirecte ont été illustrés à la Fig. 2-4. Dans la coordination indirecte, il n'y a pas d'échange de messages entre les utilisateurs finaux. Dans ce cas, une entité telle qu'un agrégateur peut coordonner indirectement les utilisateurs en diffusant un signal de réponse à la demande. Au contraire, la coordination directe peut être mise en œuvre en échangeant des messages entre les utilisateurs finaux, ce qui peut être réalisé par le biais de différentes topologies [9], [136]. L'agrégateur et le coordinateur peuvent représenter respectivement le fournisseur d'énergie et les consommateurs du groupe résidentiel.

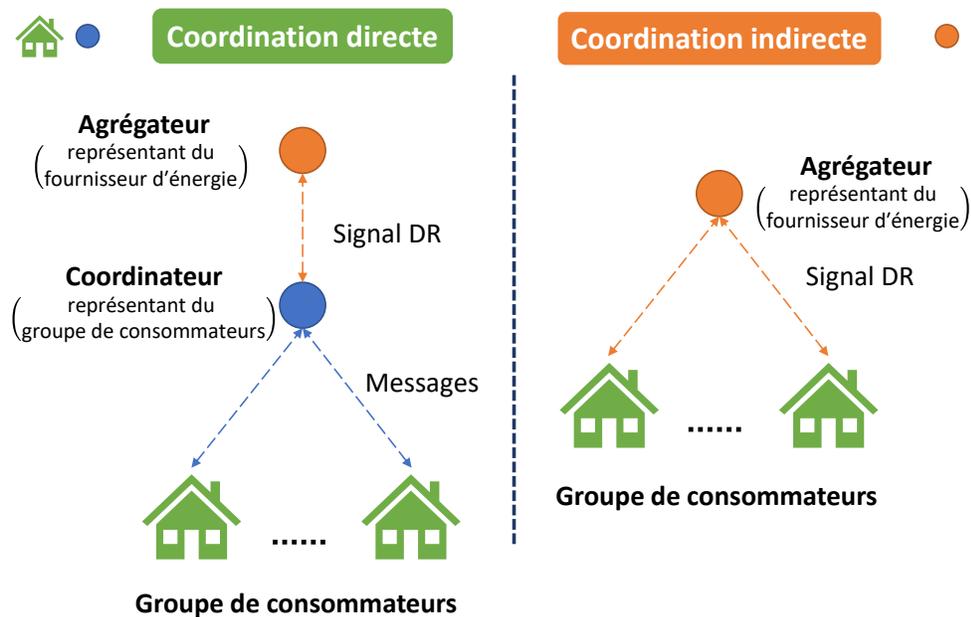


FIGURE 2-4 Un exemple de cadres de coordination directe et indirecte.

Dans [9], les auteurs ont classé les approches de coordination et mis en évidence les caractéristiques, les avantages et les inconvénients de chaque méthode. En outre, ils ont formulé des remarques importantes sur les lacunes de la littérature et suggéré une structure de coordination fonctionnelle pour les mises en œuvre pratiques des HEMS en tant qu'opportunité de travail futur. L'idée a été développée et mise en œuvre dans le cadre du présent travail.

De multiples études ont mis en évidence l'importance de la coordination indirecte des systèmes de gestion de l'énergie. La publication [137] a présenté un schéma d'ordonnement non coopératif centralisé pour gérer les véhicules électriques rechargeables et les appareils électroménagers. Le service public coordonne indirectement les EVs en mettant à jour et en diffusant la demande agrégée des EVs. Les auteurs de [138] ont modélisé un jeu d'équilibre de Nash non coopératif et a conçu un prix dynamique de l'électricité pour coordonner indirectement les batteries de stockage des ménages dans un réseau avec des clients homogènes. Le prix dynamique a été généré en se basant sur le profil de surplus/déficit de puissance du réseau. Celik et al. [35] ont suggéré un HEMS multi-agents décentralisé à l'avance dans un quartier résidentiel. Notamment, les agents changent leur décision en fonction d'un prix dynamique représentant le montant de la consommation agrégée dans chaque créneau horaire. Cependant, les agents n'échangent pas de messages avec d'autres agents et il n'y a pas d'objectifs partagés dans la fonction objectif de chaque utilisateur. Les agents cherchent à atteindre leurs objectifs individuels et sont coordonnés indirectement par le prix dynamique. Le travail [16] a étudié l'effet de la coordination décentralisée et indirecte des HEMS pour éviter les pics de rebond. Les auteurs ont mis en œuvre la coordination en transférant le profil désiré à chaque agent par l'intermédiaire du fournisseur de services énergétiques. Cependant, la décomposition du problème et les critères de génération des profils souhaités nécessitent une analyse plus approfondie. La publication [139] a conçu un cadre d'optimisation hiérarchique à trois niveaux pour coordonner les HEMS dans un réseau basse tension et l'optimisation Volt/VAR dans un réseau de distribution moyenne tension. Le problème d'optimisation présenté est résolu de manière centralisée. Les auteurs de [140] ont proposé un programme de réponse à la demande (distribuée) basé sur la décomposition proximale pour coordonner indirectement les systèmes de stockage thermique passif des bâtiments et les systèmes de stockage thermique électrique dans un groupe résidentiel. Le programme de réponse à la demande utilise une politique de tarification dynamique pour coordonner les ménages afin de réduire la consommation totale du groupe. Le travail [141] a conçu un jeu de Stackelberg basé sur la gestion du partage de l'énergie pour coordonner le partage de l'énergie des prosummateurs avec la maximisation des utilités des prosummateurs et de l'opérateur du réseau de manière indirecte. La publication [142] a suggéré un système de gestion de l'énergie distribuée basé sur le jeu de Stackelberg et

a caractérisé l'optimalité de Pareto avec les compromis entre le surplus d'énergie des ménages et le profit du détaillant. Le détaillant coordonne indirectement les consommateurs par le biais d'un prix horaire fixé à l'avance.

Plusieurs travaux ont analysé la coordination directe entre les systèmes de gestion de l'énergie. La publication [143] a présenté un cadre d'optimisation à deux niveaux pour coordonner directement les HEMS avec les ressources activées par DR. Chaque HEMS minimise son coût énergétique et l'inconfort de l'utilisateur au premier niveau. L'agrégateur minimise le coût total d'achat de l'électricité, le coût des déviations de charge et les incitations payées aux utilisateurs sur un marché journalier (day-ahead). Le problème d'optimisation a été résolu de manière distribuée en utilisant le concept de décomposition de Dantzig-Wolfe. Le travail [144] a basé une stratégie de coordination distribuée sur la théorie des jeux de négociation de Nash pour maximiser les profits des stations de recharge. La cascade de cibles analytique (Analytical Target Cascading or ATC) et la méthode des multiplicateurs à direction alternée (Alternating Direction Method of Multipliers or ADMM) ont été utilisées pour résoudre le problème de coordination directe avec un couplage parallèle à deux niveaux. Les auteurs de [145] ont analysé le problème du DR à travers un jeu à deux niveaux, y compris un jeu non coordonné au niveau du consommateur et un jeu de Stackelberg entre le niveau de l'agrégateur et le niveau de l'utilisateur. Les auteurs ont d'abord mis en œuvre la coordination indirecte, puis l'ont améliorée en coordination directe. Dans le cas de la coordination indirecte, l'agrégateur met à jour le prix de l'électricité basé sur la demande agrégée pour coordonner indirectement les clients. Ensuite, il a été amélioré en coordination directe par le partage d'informations entre les utilisateurs par le biais d'une plateforme d'information. La recherche [146] a présenté un système de gestion de l'énergie basé sur la théorie des jeux pour un système de distribution résidentiel, incluant une forte pénétration de la production distribuée, où les utilisateurs finaux forment des coalitions pour maximiser leur profit. L'étude [17] a étudié la planification coordonnée d'un district avec plusieurs centres énergétiques, y compris les énergies renouvelables, les systèmes de stockage et les charges. Les auteurs ont modélisé l'EMS coordonné comme une coordination directe à travers un jeu de négociation, où chaque agent peut négocier avec d'autres agents à travers le jeu pour échanger de l'énergie sur la base du prix négocié et accepté. En particulier, l'optimalité de Pareto a été utilisée pour garantir

une négociation équitable entre les agents. Cependant, le coordinateur ne répartit aucun objectif partagé entre les agents du centre énergétique. Juelsgaard et al. [147] ont proposé une coordination directe décentralisée et centralisée entre les utilisateurs d'un voisinage afin de gérer les charges et de réduire les pertes de puissance du système de distribution. Toutefois, la méthode ne propose pas de politique d'incitation pour encourager les clients à participer à la coordination. En outre, il n'existe pas de mécanisme permettant de mesurer les efforts des consommateurs pour partager la pénalité totale en conséquence entre les clients. En outre, l'ajout d'un mécanisme compatible avec les incitations [148] pour garantir la véracité des déclarations des agents aurait été bénéfique. Les auteurs de [149] ont étudié le flux d'énergie optimal dans le système de distribution par le biais de la coordination directe et a prévu un système de contrôle multi-agents basé sur le ALADIN, qui s'est avéré converger même pour les contraintes non linéaires et non convexes. L'ALADIN est la version améliorée de l'ADMM pour traiter les problèmes non linéaires et non convexes [9]. Han et al. [150] ont prévu un HEMS coordonné pour coordonner directement les batteries de tous les utilisateurs dans un quartier afin de minimiser le coût énergétique conjoint de la coalition. Les auteurs ont utilisé le jeu de Shapley et le jeu équilibré (Nucleolus) pour former les coalitions en fonction de leurs valeurs de Shapley associées et choisir la meilleure coalition (optimale). Cependant, la méthode proposée est centralisée et nécessite un grand nombre de calculs pour optimiser toutes les N^2 coalitions possibles pour N joueurs et trouver la coalition optimale. En plus, il n'y a pas de mécanisme de partage des gains pour distribuer le gain total après la coalition entre les joueurs. Les Tableaux 2-4 et 2-5 présentent un résumé des travaux relatifs dans la littérature. Les Tableaux comparent les contributions du présent travail avec celles d'autres études associées des points de vue de la coordination des utilisateurs au sein d'un groupe et de la coordination entre plusieurs groupes.

Les limites identifiées dans les travaux précédents sont les suivantes :

- Il n'existe pas d'analyse détaillée de la coordination distribuée et transactionnelle des HEMS dans un groupe résidentiel. Plus précisément, il n'existe pas de modèle d'agents HEMS coopératifs, ni de processus permettant de parvenir à un consensus entre eux et de trouver un équilibre entre l'incitation et la contribution du groupe.
- Le partage des objectifs communs entre les acteurs et leurs actions complémentaires

dans un cadre distribué ne sont pas pris en compte dans l'analyse de la coordination des HEMS dans un groupe résidentiel.

- Un mécanisme efficace pour mesurer la contribution de chaque consommateur à la coordination et partager le gain total en conséquence n'a pas encore été exploré.
- Le mécanisme visant à garantir la compatibilité des incitations dans le processus de coordination, incluant la distribution des objectifs partagés et les procédures de distribution des gains, n'a pas encore été étudié.
- La littérature n'a pas analysé en profondeur la coordination des systèmes de gestion de l'énergie des plinthes électriques. Il n'existe pas de cadre permettant d'établir un consensus entre tous les chauffages d'un groupe résidentiel et de partager les objectifs du groupe entre les agents afin de réduire la demande de pointe.

À la connaissance de l'auteur, aucun des travaux antérieurs mentionnés dans la littérature ne prend en compte tous ces éléments simultanément.

2.3.2 *Coordination hiérarchique de plusieurs groupes HEMS*

La coordination dans un groupe résidentiel n'est pas suffisante pour atténuer les problèmes qui se posent à différents niveaux du réseau de distribution [151]. En particulier, elle ne peut pas incorporer les contraintes couplées (capacité énergétique maximale du transformateur) entre les niveaux supérieurs et inférieurs du réseau, essentielles pour exploiter pleinement sa flexibilité. Plusieurs travaux ont étudié la coordination multiniveaux ou hiérarchique des micro-réseaux ou des groupes HEMS. La publication [139] a développé une coordination centralisée et hiérarchique des HEMS par le biais d'un cadre d'optimisation à trois niveaux. L'optimisation comprend la coordination des HEMS dans le réseau basse tension (niveau inférieur) et une régulation Volt/VAR dans le réseau moyenne tension (niveau supérieur). Les auteurs de [17] ont coordonné plusieurs centres énergétiques dans une communauté par le biais d'un jeu de négociation. Les joueurs négocient avec le service public et les autres joueurs pour échanger de l'énergie au prix négocié. L'article [152] a présenté un jeu de Stackelberg leader-suiveur pour modéliser la gestion énergétique coordonnée de plusieurs micro-réseaux. Les objectifs de chaque micro-réseau et de chaque opérateur du marché de l'énergie ont été pris en compte. Cependant, les objectifs individuels de chaque utilisateur ont été négligés.

La recherche [153] a établi la gestion transactionnelle de l'énergie dans un macro-réseau comprenant plusieurs micro-réseaux par le biais d'une optimisation hiérarchique en tant que jeu de Stackelberg multi-leader-multi-suiveur. Les auteurs ont défini les groupes de vendeurs et d'acheteurs comme leaders et suiveurs, respectivement. Cependant, le processus de prise de décision du consommateur n'a pas été étudié directement dans le jeu. Mondal et al. [154] ont conçu un jeu de Stackelberg multi-leaders-multi-suivants à travers un cadre multi-niveaux pour modéliser l'interaction entre les micro-réseaux résidentiels et les consommateurs. Les auteurs ont désigné les micro-réseaux comme des leaders et les utilisateurs comme des suiveurs. Le cadre comprend un jeu coopératif entre les leaders et un jeu non coopératif entre les clients dans chaque groupe. La publication [155] a développé un jeu de Stackelberg entre les entreprises de services publics en tant que leaders maximisant leur gain et les consommateurs en tant que suiveurs satisfaisant leur bien-être dans les micro-réseaux. Le prix généré par les compétitions des entreprises de fourniture d'énergie couple indirectement les utilisateurs au niveau le plus bas et les producteurs d'énergie au niveau le plus élevé. Anoh et al. [156] ont présenté un jeu de Stackelberg entre les producteurs et les consommateurs dans un réseau. Le travail [157] a proposé un jeu de Stackelberg à deux niveaux entre plusieurs micro-réseaux (suiveurs) et l'opérateur du réseau de distribution (leader) pour une répartition économique. Cependant, l'optimisation coordonnée des consommateurs dans chaque micro-réseau n'a pas été étudiée. Les auteurs de [158] ont établi une coordination de la gestion de l'énergie entre les micro-réseaux par le biais d'une optimisation à deux niveaux. Toutefois, les processus de prise de décision des utilisateurs et leurs contributions au processus de coordination n'ont pas été pleinement pris en compte. Dong et al. [159] ont modélisé la gestion coordonnée de l'énergie entre les consommateurs, les micro-réseaux et un groupe de micro-réseaux par le biais d'un jeu de Stackelberg hiérarchique. L'optimisation du jeu comprend des niveaux supérieurs et inférieurs. En tant que leader dans le jeu de niveau supérieur, l'agent du cluster de micro-réseaux génère un prix pour coordonner les micro-réseaux en tant que suiveurs et les agents de micro-réseaux essaient de maximiser leur profit. Les agents de micro-réseau du niveau inférieur dirigent les consommateurs en mettant à jour les prix de vente en fonction des profils des utilisateurs. Les clients, en tant que suiveurs, révisent leur profil de consommation. La publication [160] a présenté un cadre distribué basé sur l'algorithme analytique de cascade

de cibles (ATC) pour coordonner les échanges d'énergie entre plusieurs micro-réseaux. La prise de décision du consommateur n'a pas été entièrement prise en compte. L'article [161] a établi un cadre de coordination distribué pour coordonner le fonctionnement des micro-réseaux. Néanmoins, l'optimisation locale (prise de décision) des clients n'a pas été prise en compte. Les travaux [162]-[164] ont étudié le fonctionnement coordonné de plusieurs micro-réseaux sans modéliser le processus de prise de décision des utilisateurs. Les auteurs de [162]-[164] ont étudié le fonctionnement coordonné de plusieurs micro-réseaux sans modéliser le processus de prise de décision des consommateurs.

En résumé, dans les travaux connexes mentionnés ci-dessus, la plupart des modèles présentés n'ont pas formulé le lien entre les décisions des clients au niveau le plus bas avec les coordinateurs locaux de niveau intermédiaire dans chaque groupe et le coordinateur du réseau au niveau le plus élevé, qui gère les coordinateurs locaux. L'optimisation coopérative et hiérarchique entre les agents (consommateurs, coordinateurs locaux et coordinateur du réseau) à différents niveaux doit faire l'objet d'un examen plus approfondi, et les consommateurs devraient être impliqués dans le cadre transactif. En outre, le lien entre les niveaux supérieurs et inférieurs devrait être analysé en partageant les contraintes/objectifs du niveau supérieur avec les niveaux inférieurs.

- Les travaux précédents n'ont pas réparti les objectifs partagés entre les groupes résidentiels et, par conséquent, entre leurs HEMS correspondants. Les actions complémentaires des groupes et les actions complémentaires des HEMS dans chaque groupe par le biais d'un cadre distribué multi-niveaux (hiérarchique) basé sur le consensus et le partage n'ont pas été étudiées.
- La résolution des défis à différents niveaux des systèmes de distribution par le biais d'un cadre distribué hiérarchique n'est pas prise en compte dans l'analyse de la coordination des HEMS.
- Les travaux antérieurs n'ont pas étudié de mécanisme permettant de répartir les contraintes couplées de la société entre les coordinateurs des groupes résidentiels et, par conséquent, les HEMS pour relier les niveaux supérieurs et inférieurs.
- En outre, les travaux antérieurs n'ont pas conçu de partage des gains pour distribuer les gains entre les groupes et, par conséquent, entre les consommateurs.

TABLEAU 2-4 Comparaison de la littérature avec le travail présenté.

Ref.	Domaine d'étude	Topologie	Techniques	Coordination	Système de chauffage	Techniques basées sur la décomposition	Compatible avec les incitations	Partage de récompenses	Actions complémentaires des agents
[141]	Coordination à bi-niveau de l'EMS	Distribué	Jeu de Stackelberg	Indirect	X	X	X	X	X
[142]	Coordination bi-niveau des HEMS	Distribué	Jeu de Stackelberg	Indirect	✓	X	X	X	X
[137]	DR non coopératif	Centralisé	Problème MILP	Indirect	✓	X	X	X	X
[145]	DR bi-niveau non coopératif	Distribué	Jeu de Stackelberg	Direct/Indirect	X	X	X	X	X
[138]	DR non coopératif	Distribué	Équilibre de Nash	Indirect	X	X	X	X	X
[146]	Coalitions de cellules énergétiques	Centralisé	Prix de détail clair	Direct	X	X	X	✓	X
[35]	Coordination des HEMS	Distribué	Prix dynamique	Indirect	X	X	X	X	X
[17]	Centres énergétiques coopératifs	Distribué	Jeu de marchandage de Nash	Direct	X	✓	X	X	X
[147]	Réduction des pertes de distribution	Distribué	ADMM	Direct	✓	✓	X	X	X
[16]	HEMS à deux niveaux	Distribué	Le niveau supérieur définit la valeur pour les niveaux inférieurs	Indirect	X	X	X	X	X
[149]	Flux d'énergie optimal	Distribué	ALADIN	Direct	X	✓	X	X	X
[150]	Coalitions des HEMS	Centralisé	Former des coalitions et trouver la meilleure	Direct	X	X	X	X	X
[139]	Coordination multi-niveaux des HEMS	Centralisé	Cadre d'optimisation hiérarchique à trois niveaux	Indirect	✓	X	X	X	X
[143]	Coordination des HEMS	Distribué	Optimisation de bi-niveau de Dantzig-Wolfe	Direct	X	✓	X	X	X
[144]	Coalition de stations de recharge à deux niveaux	Distribué	Jeu de marchandage, P2P transaction, and ATC	Direct	X	✓	X	X	X
Approche proposée	Coordination des HEMS	Distribué	Consensus et partage des objectifs du groupe	Direct	✓	✓	✓	✓	✓

TABLEAU 2-5 Comparaison des travaux connexes avec la coordination hiérarchique proposée.

Références	Domaine d'étude	Topologie	Techniques	Coordination de groupe multi-niveaux	Partage des contraintes couplées	Système de chauffage	Techniques de décomposition	Partage multi-niveaux des gains	Actions complémentaires
[16]	HEMS bi-niveaux	Distribué	Le sous-problème supérieur définit la valeur des sous-problèmes inférieurs	X	X	X	X	X	X
[165]	Coordination des HEMS	Distribué	Consensus et partage des objectifs du groupe	X	X	✓	CS-ADMM	Partage uni-niveau des gains	✓
[160]	Coordination des micro-réseaux	Distribué	Optimisation robuste	Absence de processus décisionnel des consommateurs	X	X	Analytical target cascading (ATC)	X	X
[150]	Coalitions des HEMS	Centralisé	Jeu de Shapley et jeu équilibré pour trouver la coalition optimale	X	X	X	X	Partage uni-niveau des gains	X
[138]	Coordination du DR	Distribué	Jeu de Nash (non coopératif)	X	X	X	X	X	X
[166]	Coalitions de groupes de cellules énergétiques	Centralisé	Former des coalitions	X	X	X	X	X	X
[35]	Coordination des HEMS	Distribué	Prix dynamique et négociation	X	X	X	X	X	X
[139]	Coordination des HEMS	Centralisé	Cadre d'optimisation hiérarchique à trois niveaux	✓	X	✓	X	X	X
[17]	Centres énergétiques coopératifs	Distribué	Jeu de marchandage de Nash et optimalité de Pareto	Absence de processus décisionnel des consommateurs	X	X	ADMM	X	X
[152]	Coordination des micro-réseaux	Distribué	Jeu de Stackelberg	Absence de processus décisionnel des consommateurs	X	X	X	X	X
[153]	Coordination des micro-réseaux	Distribué	Jeu de Stackelberg (multileader-multifollower)	Absence de processus décisionnel des consommateurs	X	X	X	X	X
[154]	Coordination des HEMS	Distribué	Jeu de Stackelberg (multileader-multifollower)	✓	X	X	X	X	X
[155]	Coordination du DR	Distribué	Jeu de Stackelberg (multileader-multifollower)	✓	X	X	X	X	X
[157]	Coordination des micro-réseaux	Distribué	Jeu de Stackelberg (unileader-multifollower)	Absence de processus décisionnel des consommateurs	X	X	X	X	X
[158]	Coordination des micro-réseaux	Distribué	Jeu hiérarchique de Stackelberg	Absence de processus décisionnel des consommateurs	✓	X	X	X	X
[159]	Coordination des micro-réseaux	Distribué	Jeu hiérarchique de Stackelberg	✓	X	X	X	X	X
[161]	Coordination des micro-réseaux	Distribué	Optimisation basée sur le MPC	Absence de processus décisionnel des consommateurs	X	X	Lagrangien augmenté distribué accéléré	X	X
Approche proposée	Coordination des groupes d'HEMS	Distribué	Consensus et partage multi-niveaux (objectifs de groupe/contraintes couplées)	✓	✓	✓	CS-ADMM Multi-niveaux	✓	✓

Chapitre 3 - Coordination des HEMS

Comme expliqué dans les chapitres précédents, les répercussions de la pénétration excessive de systèmes de gestion de l'énergie domestique (HEMS) non coordonnés se sont avérées pernicieuses dans le système de distribution en ce qui concerne les contingences, les instabilités et les pics de rebond. Ce chapitre vise à concevoir une technique de coordination avec la topologie requise pour coordonner les HEMS avec les thermostats de système de chauffage à plinthes électriques activés par la réponse à la demande dans un marché monopolistique afin d'éviter les effets néfastes des HEMS non coordonnés dans un groupe résidentiel. Plus précisément, la technique proposée répond aux objectifs individuels, mais également partagés, des HEMS en modifiant les habitudes de consommation des consommateurs. En outre, une politique d'incitation a été conçue pour offrir une récompense totale à l'équipe pour encourager les clients à participer à la coordination. La technique de coordination présentée comprend un système de partage des récompenses et un système compatible avec les incitations, où le gain de l'équipe est redistribué entre les joueurs en fonction de leur contribution. En outre, la coordination conduit à des décisions complémentaires des agents et mitige les défis du groupe. La fonctionnalité et l'efficacité de l'algorithme HEMS coordonné proposé seront testées pour un set de différentes études de cas dans le dernier chapitre (le chapitre des résultats).

3.1 Cadre et modélisation du système

Un agrégateur, un coordinateur et un groupe de maisons intelligentes (SH) sont les principaux acteurs d'un voisinage résidentiel. Considérons un réseau de distribution composé d'un ensemble de R agrégateurs. Chaque agrégateur est composé de M voisinages (groupes) résidentiels dans lesquels un coordinateur est responsable de coordonner un ensemble de $N = \{1, \dots, n\}$ SH interconnectées au niveau du transformateur résidentiel comme illustré

dans la Figure 3-1. Tous les ménages d'un même groupe sont connectés au même fournisseur d'électricité (EUC¹).

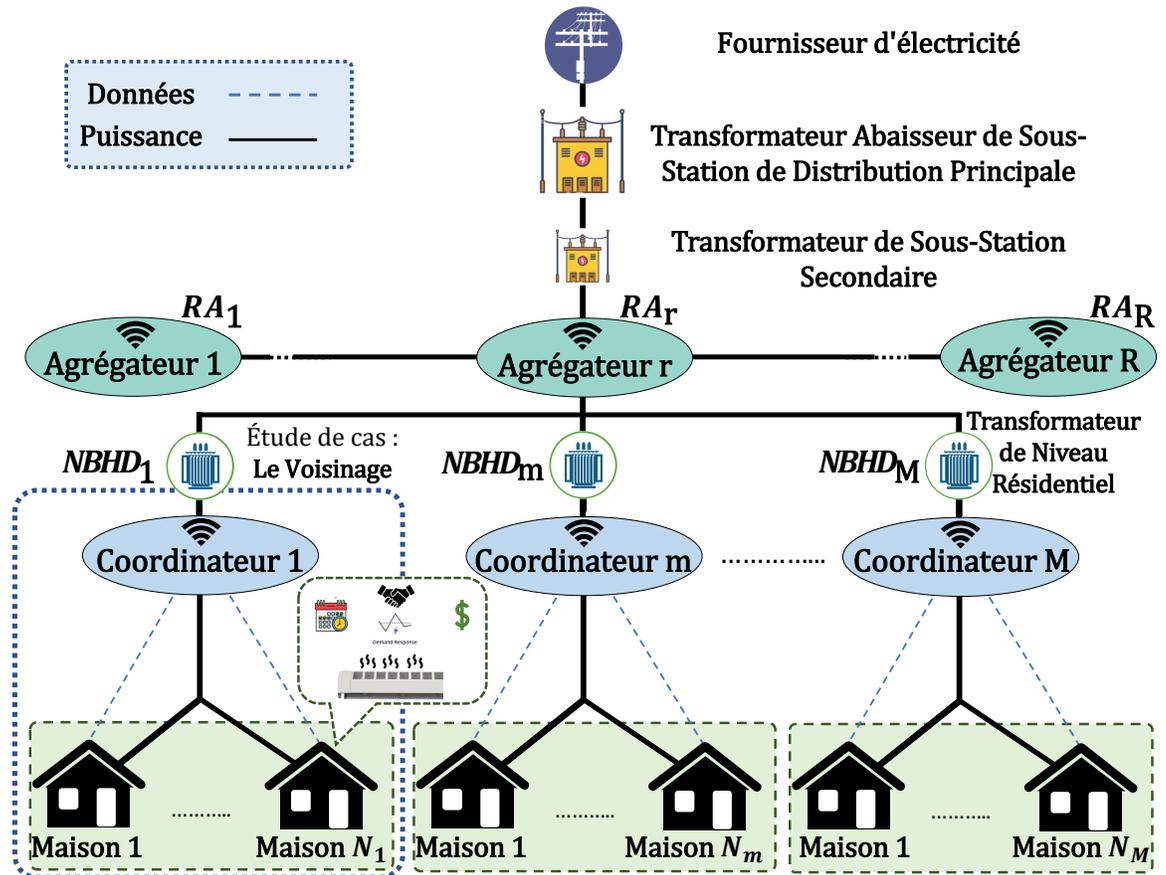


FIGURE 3-1 Le cadre de coordination des voisinages résidentiels.

Les SH sont équipées de charges programmables et non programmables, où les charges programmables agissent comme la source de flexibilité pour participer aux programmes de DR. Ici, nous supposons que chaque SH est équipée d'une charge programmable. Précisément, toutes les SH considérées utilisent des chauffages à plinthes électriques (EBH²) ou des convecteurs avec des thermostats muraux comme système de chauffage principal et comme source de flexibilité dans les programmes de DR. Notez que chaque SH a un degré de flexibilité spécifique et différent, déterminé par les préférences de l'utilisateur, notamment le point de consigne et le niveau de confort. Les agrégateurs fournissent M voisinages résidentiels dans le niveau secondaire du transformateur de distribution. Les agrégateurs échangent des données

1. en anglais Electric Utility Company en abréviation "EUC"

2. en anglais Electric Baseboard Heaters en abréviation "EBH"

avec l'EUC et le coordinateur. Chaque voisinage possède un coordinateur en tant qu'entité indépendante responsable de la coordination des réponses à la demande des SH. Il transmet des signaux aux SH pour coordonner leur prise de décision distribuée afin de garantir la satisfaction des objectifs communs. Il est important de noter que les SH sont connectées au coordinateur avec une topologie de connexion en étoile [9], et que les décisionnaires sont des HEMS.

L'idée principale est de relever les défis du réseau local en coordonnant la prise de décision des SH au niveau des voisinages. Pour cela, les HEMS doivent collaborer pour atteindre des objectifs individuels et communs. Pour assurer l'autonomie, nous supposons que les SH emploient des systèmes HEMS locaux. À l'intérieur, les HEMS transmettent des signaux de contrôle à leurs actifs internes programmables (charges) pour optimiser la consommation d'énergie et réduire la facture d'électricité. À l'extérieur, les HEMS envoient leurs décisions (profils) au coordinateur du voisinage et reçoivent les variables globales et duales actualisées de l'équipe. Le coordinateur génère ces variables globales et duales en fonction des objectifs partagés du groupe. De cette façon, les SH négocient itérativement avec le coordinateur jusqu'à ce que les joueurs de ce jeu de négociation parviennent à un consensus. Dans le même temps, les ménages peuvent également acheter de l'électricité de manière indépendante auprès de l'EUC. Les HEMS sont des agents rationnels, efficaces, compatibles avec les incitations (la véracité des déclarations des consommateurs), et équilibrés au niveau du budget.

3.2 Niveaux d'optimisation de la coordination des HEMS

Dans cette thèse, la coordination des HEMS est effectuée en se basant sur la technique de la Méthode des Multiplicateurs de Direction Alternée (ADMM¹) basée sur les concepts de partage d'objectifs communs et de formation de consensus [9], [53]. Les informations sur l'algorithme ADMM telles que les équations mathématiques, les conditions de convergence, la preuve de convergence et les applications sont présentées dans [9], [53]. L'architecture de l'approche de coordination proposée est présentée dans la Figure 3-2. La topologie de coordination proposée est compatible avec l'architecture de voisinage existante dans le système de distribution. Le coordinateur est placé au niveau du transformateur résidentiel. Dans cette

1. en anglais Alternating Direction Method of Multipliers et en abréviation "ADMM"

topologie, il y a trois joueurs principaux : l'agrégateur, le coordinateur et un groupe de ménages. L'agrégateur est responsable de la détermination du niveau souhaité du facteur de charge du profil de la puissance agrégée, le prix et les récompenses. Le coordinateur est en charge de coordonner le groupe résidentiel en échangeant des données avec les agents (HEMS) et l'agrégateur, et de satisfaire les objectifs communs. Enfin, le HEMS de chaque SH est responsable de minimiser la facture d'électricité de cette maison, de maximiser le confort des occupants (température interne) et de maximiser la récompense de la part du coordinateur par ses efforts en faveur de l'objectif du groupe.

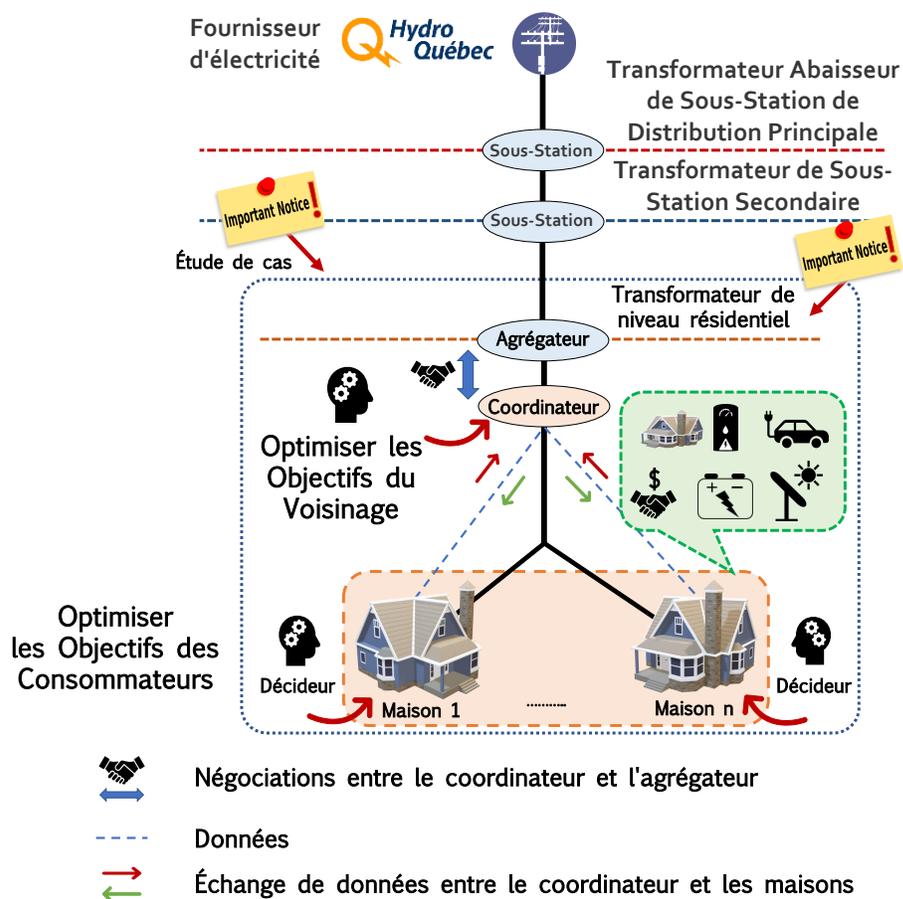


FIGURE 3-2 L'architecture proposée pour la coordination des HEMS.

Comme illustré dans la Figure 3-3, nous considérons trois niveaux d'optimisation.

- Optimisation Niveau 1 : Négociation (optimisation de l'agrégateur et du coordinateur comme un accord gagnant-gagnant)

- Optimisation Niveau 2 : Coordination (optimisation au niveau du coordinateur pour coordonner un groupe de résidences).
- Optimisation Niveau 3 : Optimisation dans chaque ménage (satisfaire les objectifs individuels)

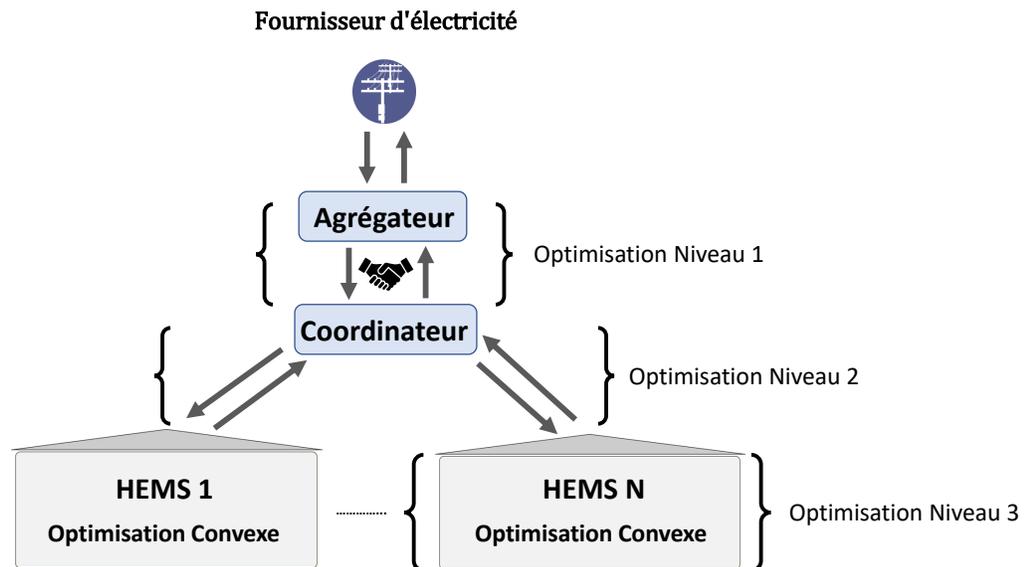


FIGURE 3-3 Niveaux d'optimisation dans le système HEMS coordonné proposé.

3.2.1 Négociation entre l'agrégateur et le coordinateur

Au premier niveau d'optimisation, le coordinateur et l'agrégateur négocient les récompenses et les prix. Cette négociation est équitable pour les deux parties et est mise en œuvre comme un accord gagnant-gagnant ou une optimalité de Pareto. Dans cette étape, nous supposons que la négociation entre l'agrégateur et le coordinateur est faite et connue. Donc, dans ce niveau d'optimisation, nous proposons une fonction de récompense totale qui détermine la récompense totale payée par l'agrégateur au coordinateur pour l'ensemble du groupe. La récompense est proportionnelle au facteur de charge du profil de charge agrégé. En effet, le voisinage recevra sa récompense en fonction de son niveau de flexibilité pour modifier le profil agrégé afin d'améliorer le facteur de charge (LF). Il faut noter qu'il est très difficile d'atteindre un LF très élevé et que cela dépend de la flexibilité de l'équipe. Les préférences individuelles et le niveau de confort souhaité limitent le niveau de flexibilité du voisinage et

évitent de trop modifier les comportements des ménages et évitent également de s'éloigner des points de consignes/préférences des consommateurs. Cependant, même avec ces limitations, le voisinage a suffisamment de potentiel pour améliorer le facteur de charge du profil agrégé et maximiser la récompense reçue. La récompense totale reçue sera partagée entre les agents par le coordinateur en fonction de leurs efforts dans la coordination.

3.2.2 *Coordination entre les HEMS (optimisation niveau 2)*

Ce niveau d'optimisation permet d'obtenir un consensus parmi les membres (HEMS) du groupe résidentiel et de former une coordination pour satisfaire les objectifs partagés dans le groupe tout en respectant les objectifs/contraintes individuels des ménages. Les objectifs partagés sont conçus et choisis afin d'atténuer les défis spécifiques du groupe résidentiel ou du réseau local en fonction des besoins du fournisseur d'électricité. Dans cette thèse, nous implémentons le problème de coordination comme un problème d'optimisation distribué et convexe. Le problème principal de coordination centralisée, qui est plus grand et complexe, est décomposé en plusieurs sous-problèmes d'optimisation convexe plus simples à l'échelle de chaque ménage en tenant compte des objectifs individuels et un problème d'optimisation convexe au niveau du coordinateur pour satisfaire les objectifs partagés. Des variables globales/duales sont générées pour coordonner les sous-problèmes. Le problème de coordination peut ainsi être résolu de manière distribuée sur plusieurs processeurs. Chaque agent résout son problème d'optimisation localement et en parallèle, puis échange ses décisions avec le coordinateur. Le coordinateur échange des données (variables globales et duales) et partage les objectifs communs entre les agents. En plus, nous concevons un mécanisme pour mesurer la contribution de chaque client et distribuer en conséquence le gain total entre eux. Ceci sera mis en œuvre par la technique de coordination, la politique d'incitation et le mécanisme de partage des récompenses (gains) que nous proposons.

3.2.3 *Optimisation dans chaque SH (optimisation niveau 3)*

Le troisième niveau d'optimisation est mis en œuvre dans chaque SH afin de satisfaire les objectifs et les préférences individuelles de l'utilisateur. Dans ce niveau d'optimisation, le décideur est chaque HEMS. En conséquence, le problème d'optimisation dans chaque HEMS

garantit les objectifs individuels du client, incluant la minimisation des coûts, la maximisation du confort et la maximisation de la récompense dans le cas où le consommateur participe à un programme de réponse à la demande. En même temps, l'optimisation garantit les préférences du client, y compris le point de consigne de la température intérieure, les niveaux de confort en fonction de l'occupation et la plage de température intérieure acceptable, et respecte les autres contraintes telles que la plage de puissance acceptable du chauffage et la limite de puissance maximale de le ménage. Dans ce travail, nous implémentons tous les problèmes d'optimisation dans les cadres d'optimisation convexe afin de garantir la convergence.

3.3 Modélisation du système

Cette section explique la modélisation du voisinage résidentiel, du prix de l'électricité et des SH, y compris les charges électriques et le comportement des consommateurs.

3.3.1 Modèle de groupe résidentiel

Considérons que toutes les SH sont situées à proximité les unes des autres dans un voisinage résidentiel composé d'un groupe de ménages et d'un agrégateur. Comme illustré dans la Figure 3-1, une zone résidentielle (société) est conceptuellement divisée en M groupes résidentiels, où chacun comprend un coordinateur et un set de $N = \{1, \dots, n\}$ SH au niveau du transformateur résidentiel. Soit $NBHD_j$ ¹ représente le set de maisons dans le $j^{\text{ème}}$ voisinage, où $j \in \{1, \dots, m\}$. Chaque ménage est rattaché à un seul groupe résidentiel, donc il n'y a pas de ménage commun entre les deux voisinages,

$$NBHD_f \cap NBHD_g = \emptyset, \quad \forall f \neq g, \quad (3.1)$$

où $NBHD_f$ et $NBHD_g$ représentent les voisinages f et g , respectivement. L'énergie agrégée de chaque voisinage est représentée par $U_j^{NBHD} = |\sum_{1 \leq i \leq n} u_i(h)|$. h représente l'horizon de temps. Au niveau de l'agrégateur, les voisinages partagent une connexion commune. Les connexions conjointes au niveau de l'agrégateur et au niveau du voisinage ont des contraintes de capacité

1. Voisinage en anglais "Neighborhood"

qui sont présentées par

$$\left| \sum_{1 \leq i \leq n} u_i(h) \right| \leq U_{j,max}^{NBHD}, \quad (3.2a)$$

$$\left| \sum_{1 \leq j \leq m} U_j^{NBHD}(h) \right| \leq U_{a,max}^{RA_a}, \quad j \in \{1, \dots, m\}. \quad (3.2b)$$

Les équations (3.2a) et (3.2b) représentent la limite supérieure de l'importation ou de l'exportation totale d'énergie de chaque voisinage et agrégateur, respectivement. Ici, $U_{a,max}^{RA_a}$ représente la limite supérieure de l'énergie totale importée ou exportée par l'agrégateur RA_a , où $a \in \{1, \dots, r\}$. Par ailleurs, $U_{j,max}^{NBHD}$ symbolise la limite supérieure de l'énergie totale importée ou exportée par le voisinage j .

3.3.2 Modèle de coût de l'électricité

Ce travail utilise le tarif fixe π et le coût de l'énergie consommée du ménage peut être exprimé par,

$$c_i^u = \sum_{h=1}^H \pi u_i(t), \quad (3.3)$$

où c_i^u indique le coût de l'énergie de la maison i . Le prix fixe permet une répartition juste de la programmation de la consommation d'énergie des consommateurs au cours de la journée du point de vue du tarif de l'électricité. En effet, le prix de l'énergie dans les différents créneaux horaires de la journée est fixe.

3.3.3 Modèle de charges de maison

Supposons que $H = 144$ représente la durée de l'horizon de temps, et les mesures (échantillonnage) se produisent chaque 10 minutes pendant la journée. Cela implique que l'intervalle $[1, H]$ est divisé en H intervalles de 10 minutes. En effet, le set de temps d'échantillonnage peut être désigné par $\tau \equiv \{1, 2, \dots, H\}$. Les agents résidentiels peuvent modifier et planifier l'énergie demandée par leurs charges flexibles. Par conséquent, les dispositifs peuvent être classés en deux catégories :

- Charge flexible : Cette catégorie comprend les systèmes de plinthes chauffantes électriques (EBH) régis par le signal de commande des thermostats intelligents en tenant compte du confort de l'utilisateur. La possibilité de modifier le profil des EBHs en fonction des

préférences du client, comprenant les points de consignes et les niveaux de confort pendant la journée, fournit la source de flexibilité requise pour les agents résidentiels dans le cadre du programme DR.

- Charge fixe : Cette catégorie fait référence aux appareils ménagers non programmables. Ces charges fixes fonctionnent sur la base de leurs modèles de consommation d'énergie standard associés à l'occupation et aux activités des occupants. Ces charges ne sont pas flexibles et ne peuvent pas être planifiées pendant le programme DR.

3.3.3.1 Plinthes Chauffantes Électriques Thermostats (EBHT) :

Pour chaque ménage i , la température intérieure $T_i(t)$ est considérée comme la variable d'état (vecteur), et peut être représentée par $T_i(t) = [T_i(1), T_i(2), \dots, T_i(H)]$. Les points de consigne et le niveau de confort désirés par l'utilisateur déterminent la température intérieure et le profil de consommation de l'énergie de l'EBH (u_i^{EBH}). Le modèle thermique linéaire suivant modélise la dynamique de chaque maison.

$$T_i(t+1) = \Psi_i^A T_i(t) + \Psi_i^B u_i^{EBH}(t) + \Psi_i^C w_i(t), \quad (3.4)$$

où Ψ_i^A , Ψ_i^B , et Ψ_i^C sont les paramètres des coefficients thermiques de chaque maison et représentent la dépendance de la température intérieure dans la tranche de temps $t+1$ à la température intérieure T_i , la consommation d'énergie de l'EBH u_i^{EBH} , et la température extérieure w_i dans la tranche de temps t , respectivement.

3.3.3.2 Autres charges (charges fixes) :

Dans ce travail, les autres charges, à l'exception de l'EBH, ont été modélisées à partir des données expérimentales enregistrées par Hydro-Québec sur la consommation énergétique des ménages au Québec. Ces charges comprennent les charges fixes non planifiables telles que le réfrigérateur, le lave-vaisselle, la télévision, la machine à laver, la sècheuse, l'éclairage, etc. La configuration de validation présentée dans la section de validation clarifie le processus de modélisation des charges fixes. Selon la classification de la consommation des ménages en charges fixes et charges planifiables (EBH), la demande totale d'énergie de chaque maison

peut être démontrée par

$$u_i(t) = u_i^{EBH}(t) + u_i^O(t), \quad (3.5)$$

où u_i représente la consommation totale d'énergie du ménage i , u_i^{EBH} indique la consommation d'énergie de l'EBH, et u_i^O exprime la consommation totale des charges à l'exception de l'EBH.

3.3.3.3 Comportement du consommateur et flexibilité :

Le comportement du consommateur a un impact sur le coût de l'énergie et l'inconfort. Supposons que $T_i^{u_i}(t)$ représente la température intérieure de la maison i dans la tranche de temps t et que $d_i^{u_i}(t)$ représente l'inconfort de l'utilisateur. Ici, u_i est inclus explicitement dans les notations de l'inconfort et du coût énergétique pour mettre en évidence la trajectoire de l'état $T_i(t)$, l'inconfort $d_i^{u_i}$ et le coût énergétique $c_i^{u_i}$ sont le résultat d'un profil de consommation spécifique u_i . Étant donné $T_i(t)$, l'inconfort des occupants de le ménage i peut être modélisé par une fonction d'utilité quadratique comme,

$$d_i^{u_i}(t) = \delta_i(t) (T_i^{\text{comf}}(t) - T_i^{u_i}(t))^2, \quad (3.6)$$

où le terme $T_i^{\text{comf}}(t)$ indique la température intérieure souhaitée (meilleur confort) dans la tranche de temps t . Le terme $\delta_i(t)$ définit les niveaux de confort dans chaque intervalle de temps et peut prendre deux valeurs de l'ensemble $\delta_{set} = \{0, \delta_{\max}\}$. Lorsque $\delta_i(t) = \delta_{\max}$, les occupants souhaitent se rapprocher du point de consigne de température confortable. Cette stratégie établit le moment où le confort est essentiel et maximise la flexibilité sans compromettre les contraintes thermiques de la maison. Au contraire, lorsque $\delta_i(t) = 0$, l'utilisateur opte pour le mode économique. Ainsi, l'agent modifie librement la température interne tout en respectant les contraintes,

$$T_i^{u_i}(t) \in [T_i^{\min}, T_i^{\max}], \quad (3.7a)$$

$$\delta_{set} = \{0, \delta_{\max}\}, \quad (3.7b)$$

$$u_i^{EBH}(t) \in [u_i^{EBH,\min}, u_i^{EBH,\max}], \quad (3.7c)$$

où $u_i^{EBH,\min}$ et $u_i^{EBH,\max}$ représentent respectivement la consommation d'énergie EBH minimale et maximale acceptable. De même, T_i^{\min} et T_i^{\max} indiquent les températures intérieures minimales et maximales acceptables, respectivement. Par exemple, un consommateur peut choisir le mode confort, $\delta_i(t) = \delta_{\max}$, pendant les tranches de temps où la maison est occupée, et peut choisir le mode économique, $\delta_i(t) = 0$, pendant les tranches de temps où la maison est inoccupée. La valeur de $\delta_i(t)$ détermine le niveau de flexibilité du client. En outre, elle définit le facteur de pondération du confort qui représente la capacité de l'utilisateur à sacrifier son confort pour participer à un programme de DR. La norme ASHRAE-55-2004, préparée par le Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST), définit la plage de températures acceptables pour la saison hivernale dans une zone de 20 – 23 °C [167]. Pour modéliser les préférences des utilisateurs en matière de points de consigne de température intérieure et de zones de confort, les classifications des points de consigne fréquents basées sur les conditions de confort thermique de la norme ASHRAE-55 ont été utilisées. L'ensemble des valeurs possibles pour $T_i^{\text{comf}}(t)$ et la distribution associée (probabilités) ont été choisis sur la base de nos travaux précédents [167]. Le set et la distribution de la température intérieure souhaitée sont élaborés dans la section de validation du chapitre sur la simulation et l'évaluation des performances.

3.4 Formulation du problème et proposition de coordination des HEMS

3.4.1 Formulation du problème

Les principaux objectifs de chaque consommateur sont de minimiser la facture d'électricité et de maximiser le confort. Chaque client essaie de minimiser la facture d'électricité (3.3) et l'inconfort encouru (3.6). Par conséquent, l'optimisation est exécutée en respectant à la fois les contraintes individuelles du ménage (3.4), (3.7a), (3.7b), et (3.7c), et les contraintes du côté de l'agrégateur (3.1), (3.2a), et (3.2b). La fonction d'objectifs individuels de chaque ménage est exprimée par,

$$F_i^{\text{indv}}(u_i(t)) = c_i^{u_i} + d_i^{u_i}. \quad (3.8)$$

Dans un système HEMS centralisé, le problème d'optimisation de la planification de la consommation d'énergie des ménages est formulé comme suit,

$$\begin{aligned} & \underset{u_i(t)}{\text{minimize}} \quad \sum_{i=1}^N F_i^{indv}(u_i(t)), \\ & \text{s.t. : } (3.1), (3.2a), (3.2b), (3.3), (3.4), (3.5), (3.6), (3.7a), (3.7b), (3.7c). \end{aligned} \quad (3.9)$$

où $c_i^{u_i}$, $d_i^{u_i}$ et $u_i(t)$ sont des vecteurs de la taille de l'horizon et ont des valeurs pour chaque tranche de temps. Ici, les fonctions de coût et les contraintes des ménages sont respectivement convexes et linéaires. Dans le cas centralisé, le problème (3.9) est résolu par une entité centrale, le fournisseur d'électricité. Le fournisseur a les droits de contrôle pour trouver la solution optimale et planifier les charges flexibles en conséquence.

3.4.2 Proposition de HEMS coordonnés et distribués

Les HEMS coordonnés tentent de répondre aux objectifs individuels et de servir simultanément le réseau de distribution en répondant à des objectifs partagés pour relever les défis locaux du réseau.

3.4.2.1 Les joueurs et la topologie :

L'approche coordonnée proposée pour les HEMS comprend trois joueurs principaux dans un groupe résidentiel. Comme illustré dans la Figure 3-4, les acteurs sont les HEMS dans chaque SH, un coordinateur, et un agrégateur. Tout d'abord, chaque agent reçoit le prix de l'électricité, le taux de récompense de la coordination, les variables globales/duales et les données météorologiques envoyées par le coordinateur et construit le modèle thermique. Ensuite, chaque HEMS résout une optimisation convexe pour minimiser la facture d'électricité, maximiser le confort de l'utilisateur et maximiser le partage de la récompense en maximisant la contribution du client à la coordination. Après avoir résolu le problème d'optimisation locale, chaque consommateur envoie au coordinateur le profil de charge optimal déterminé par l'optimiseur. L'optimisation convexe du coordinateur est ensuite exécutée pour les tâches principales suivantes :

- aplanir le profil agrégé (améliorer le facteur de charge agrégé),

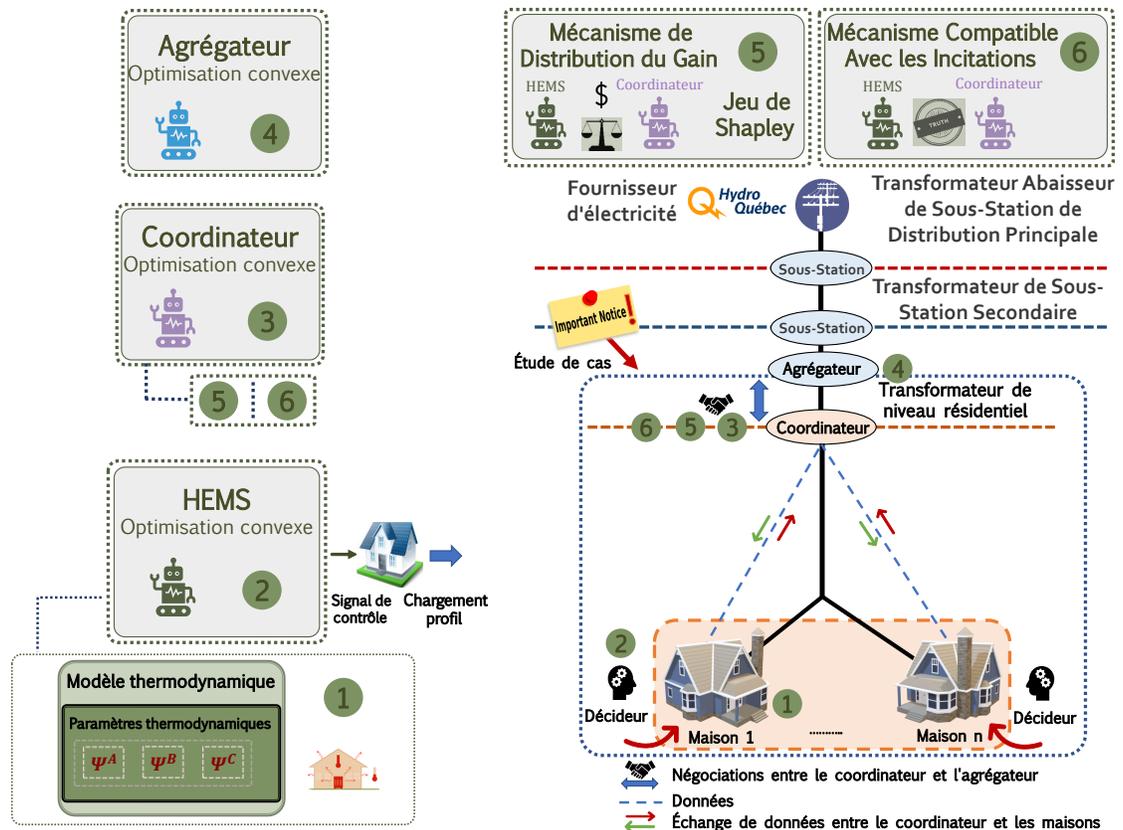


FIGURE 3-4 Le diagramme de blocs de l'approche proposée pour la coordination des HEMS.

- minimiser la facture d'électricité du groupe agrégée,
- maximiser le gain total du groupe (récompense),
- distribuer le gain entre les joueurs de manière équitable,
- garantir l'intégrité des joueurs, et
- négocier avec l'agrégateur pour le taux de récompense et le facteur de charge (LF) souhaité.

Le coordinateur reçoit le prix de l'électricité et le taux de récompense total de l'agrégateur et recueille les profils de charge de chaque ménage. Le coordinateur calcule le profil agrégé optimal et met à jour les variables globales pour amener les membres de l'équipe à satisfaire les objectifs individuels et les objectifs partagés. L'agrégateur est responsable de :

- définir la fonction de récompense et l'envoyer au coordinateur,
- envoyer le tarif d'électricité, et

- négocier avec le coordinateur le taux de récompense pour satisfaire les objectifs du fournisseur d'électricité.

Les rôles des joueurs et les fonctions des mécanismes dans la technique de coordination proposée sont résumés dans le Tableau 3-1. Notez que l'agrégateur reçoit des données du fournisseur d'électricité et du coordinateur. En outre, l'agrégateur détermine le taux de récompense en fonction des objectifs du fournisseur et des défis du réseau local.

3.4.2.2 Formulation du problème de la coordination des HEMS :

Notre contribution est mise en évidence par la méthodologie et la formulation du problème de coordination des HEMS. Le système HEMS coordonné proposé est modélisé comme un accord «gagnant-gagnant». La section suivante présente la méthode proposée de coordination des HEMS distribués qui s'appuie sur la méthode ADMM [53]. L'approche proposée est un processus itératif pour trouver la solution distribuée et optimale au problème de coordination. Entrer dans les détails de l'ADMM dépasse le cadre de ce travail. Ce travail se contente de délimiter la technique et de décrire les avantages d'une version développée d'ADMM concernant notre application pour établir un consensus et partager les objectifs communs entre les agents. [53] élabore les détails pour la compréhension de base d'ADMM. Le problème de coordination HEMS (consensus et partage) est formulé de manière centralisée comme,

$$\underset{u_i(t)}{\text{minimize}} \sum_{i=1}^N F_i^{indv}(u_i(t)) + CR F^{shr} \left(\sum_{i=1}^N u_i(t) \right), \quad (3.10)$$

où $u_i(t)$ représente le vecteur de la décision de chaque ménage avec une longueur de H pour tous les créneaux horaires., F_i^{indv} indique la fonction objective locale de chaque maison, $F^{shr} \left(\sum_{i=1}^N u_i(t) \right)$ représente la fonction objectif partagé, et CR désigne le niveau de coordination. L'objectif communs F^{shr} est une fonction de la somme de toutes les décisions des consommateurs (profils de consommation). Le niveau de coordination met en évidence l'importance des objectifs partagés par rapport aux objectifs individuels. Le problème (3.10) est réécrit comme un problème centralisé sous forme ADMM en copiant toutes les variables

TABLEAU 3-1 Rôles des joueurs et fonctions des mécanismes dans le cadre de coordination proposé.

	HEMS	<ul style="list-style-type: none"> i) Minimiser la facture d'électricité ii) Maximiser le confort iii) Maximiser la part de gain (maximiser la contribution dans la coordination) iv) Échange de données avec le coordonnateur
Joueurs	Coordonnateur	<ul style="list-style-type: none"> i) Aplatissement du profil agrégé (amélioration du facteur de charge agrégé) ii) Minimiser la facture d'électricité du groupe agrégé iii) Maximiser le gain total du groupe (récompense) iv) Répartir les gains entre les joueurs de manière équitable v) Garantir la véracité des informations fournies par les joueurs vi) Diffusion des données entre les joueurs vii) Négociation avec l'agrégateur pour le taux de récompense et le facteur de charge souhaité.
	Agrégateur	<ul style="list-style-type: none"> i) Réglage de la fonction de récompense et transmission au coordonnateur ii) Envoi du tarif d'électricité iii) Négocier avec le coordonnateur le taux de récompense et les objectifs du fournisseur d'électricité iv) Définir des objectifs communs (partagés) pour résoudre les défis du réseau local
Mécanismes	Distribution du Gain	<ul style="list-style-type: none"> i) Mesurer la contribution de chaque consommateur à la coordination ii) Partager équitablement le gain total entre les consommateurs participants
	Compatibilités Incitations	<ul style="list-style-type: none"> i) Garantir la véracité des informations fournies par le consommateur

comme,

$$\begin{aligned} & \underset{u_i(t) \ \& \ z_i(t)}{\text{minimize}} \sum_{i=1}^N F_i^{indv}(u_i(t)) + CR F^{shr} \left(\sum_{i=1}^N z_i(t) \right), \\ & \text{s.t.} : u_i - z_i = 0, \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$(3.1), (3.2a), (3.2b), (3.3), (3.4), (3.5), (3.6), (3.7a), (3.7b), (3.7c),$$

où u_i et z_i expriment les variables d'optimisation, u_i indique les décisions locales des ménages, et z_i présente les décisions du coordinateur (variables globales). Pour simplifier la fonction objectif partagé et le problème d'optimisation du coordinateur, le problème (3.11) est réécrit comme suit :

$$\begin{aligned} & \underset{u_i(t) \ \& \ \bar{Z}(t)}{\text{minimize}} \sum_{i=1}^N F_i^{indv}(u_i(t)) + CR F^{shr} (N\bar{Z}(t)), \\ & \text{s.t.} : \bar{Z}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i(t) \ \& \ u_i - z_i = 0, \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$(3.1), (3.2a), (3.2b), (3.3), (3.4), (3.5), (3.6), (3.7a), (3.7b), (3.7c).$$

Le problème (3.12) est reformulé comme du partage-consensus basé problème distribué dans la forme scalée d'ADMM par (3.13a)-(3.13c).

$$u_i^{k+1} := \arg \min_{u_i} (F_i^{indv}(u_i) + \frac{\rho}{2} \|u_i - u_i^k + \bar{u}^k - \bar{Z}^k + \lambda^k\|_2^2), \quad (3.13a)$$

$$\bar{Z}^{k+1} := \arg \min_{\bar{Z}^k} (CR F^{shr}(N\bar{Z}^k) + \frac{N\rho}{2} \|\bar{Z}^k - \lambda^k - \bar{u}^{k+1}\|_2^2), \quad (3.13b)$$

$$\lambda^{k+1} := \lambda^k + \bar{u}^{k+1} - \bar{Z}^{k+1}, \quad (3.13c)$$

où u indique la décision du consommateur, \bar{u} représente la moyenne des décisions de tous les clients, ρ exprime le taux de convergence avec une valeur positive, k représente le nombre d'itérations, N représente le nombre d'agents, λ désigne la variable duale, et \bar{Z} symbolise la moyenne des variables globales.

Le consensus des agents fait que les variables duales λ_i^k sont égales à une seule variable duale λ^k . Le partage conduit à distribuer les objectifs communs F^{shr} entre les agents. L'étape

de mise à jour u de la procédure de coordination HEMS , désignée par (3.13a), est exécutée indépendamment en parallèle par chaque agent i pour $i \in \{1, \dots, N\}$. L'étape de mise à jour \bar{Z} collecte tous les u_i^{k+1} pour former la moyenne des décisions des agents et résoudre ensuite un problème avec n variables. En outre, l'étape de mise à jour λ de l'algorithme de coordination, symbolisée par (3.13c), est exécutée pour mettre à jour la variable duale. Le coordinateur met à jour les variables globales et duales et les transmet en conséquence à tous les agents pour établir le consensus. Ainsi, les HEMS adressent les problèmes locaux correspondants dans un processus itératif et échangent des données (variables globales et duales) avec le coordinateur pour former la coordination. Chaque agent gère les objectifs locaux, les contraintes et les termes quadratiques. Les agents essaient de minimiser les termes quadratiques, ce qui les amène à suivre le coordinateur et à atteindre un consensus après un processus itératif. Les agents modifient leurs décisions et mettent à jour le terme quadratique à chaque itération pour conduire les variables locales à converger vers la valeur commune. La valeur commune représente la solution optimale pour satisfaire les objectifs individuels et partagés.

Dans l'approche de coordination proposée, chaque agent prend la décision localement de manière distribuée. Le coordinateur collecte les décisions locales et essaie de mettre à jour la variable globale en conséquence pour conduire l'équipe à atteindre les objectifs communs. Le processus de coordination s'arrête lorsque le résiduel dual est égal à zéro ou que le nombre d'itérations atteint le nombre prédéterminé. Les objectifs partagés sont définis pour assurer la planéité du profil de consommation agrégé et la minimisation des coûts énergétiques agrégés. Par conséquent, les objectifs partagés dans le voisinage sont conçus comme suit,

$$F^{shr}(N\bar{Z}) = CR(F_{fl}^{shr}(N\bar{Z}) + F_{cons}^{shr}(N\bar{Z})), \quad (3.14a)$$

$$F_{fl}^{shr}(N\bar{Z}) = \left\| N\bar{Z} - \left(\sum_{h=0}^H \frac{N\bar{Z}_h}{H} \right) \right\|_2^2, \quad (3.14b)$$

$$F_{cons}^{shr}(N\bar{Z}) = \left\| \sum_{h=0}^H N\bar{Z}_h \right\|_2^2, \quad (3.14c)$$

où F^{shr} représente les objectifs partagés, F_{fl}^{shr} mesure la planéité du profil de consommation agrégée, F_{cons}^{shr} représente la consommation d'énergie agrégée dans l'équipe, CR indique le

niveau de coordination, $\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i$, $N\bar{Z}$ exprime la variable globale du profil agrégé des ménages du voisinage (équipe), et \bar{Z}_h désigne la variable globale \bar{Z} dans la tranche de temps h . Le niveau de coordination CR détermine l'importance des objectifs partagés par rapport aux objectifs individuels. La valeur de CR peut être choisie dans l'intervalle de $CR \in [0, 1]$. $CR = 0$ implique le cas où il n'y a pas de coordination entre les agents. Au contraire, $CR = 1$ représente le niveau maximal de coordination pour atteindre les objectifs partagés. Le coordinateur peut contrôler le niveau de coordination du niveau minimum (non coordonné) au niveau maximum (coordonné) en ajustant le paramètre CR . En effet, le coordinateur sert de représentant des consommateurs dans l'équipe et maximise le profit des clients dans la négociation avec l'agrégateur. Le coordinateur utilise la flexibilité potentielle du groupe pour maximiser le gain total. Le paramètre CR et les objectifs partagés peuvent être mis à jour après la négociation entre le coordinateur et l'agrégateur. Lors de la négociation, l'objectif de l'agrégateur est de résoudre les problèmes du réseau local en déterminant l'objectif partagé dans la coordination. Le coordinateur essaie de négocier le taux de récompense pour augmenter le gain.

3.4.2.3 Fonction de récompense agrégée :

Le coordinateur et l'agrégateur négocient les récompenses et les prix. Notamment, cette négociation est juste pour les deux parties et mise en œuvre comme un jeu gagnant-gagnant ou une optimalité de Pareto. Cette étape suppose que la négociation entre l'agrégateur et le coordinateur est accomplie et connue. Par conséquent, une fonction de récompense totale est proposée à ce niveau d'optimisation pour fixer la récompense totale payée par l'agrégateur au coordinateur pour toute l'équipe. La récompense est proportionnelle au facteur de charge du profil de charge agrégé. Dans ce travail, le facteur de charge exprime le ratio entre la charge moyenne sur une période donnée (une journée) et la charge de pointe (demande maximale) se produisant au cours de cette période spécifique. Le facteur de charge [16] est calculé selon (3.15).

$$LF = \frac{\text{Charge Moyenne}}{\text{Charge de Pointe}}. \quad (3.15)$$

La fonction de récompense totale est illustrée à la Figure 3-5 et formulée comme suit,

$$R_{Total} = \frac{1}{1 + e^{-C_1(LF - C_2)}} R_{rate}, \quad (3.16)$$

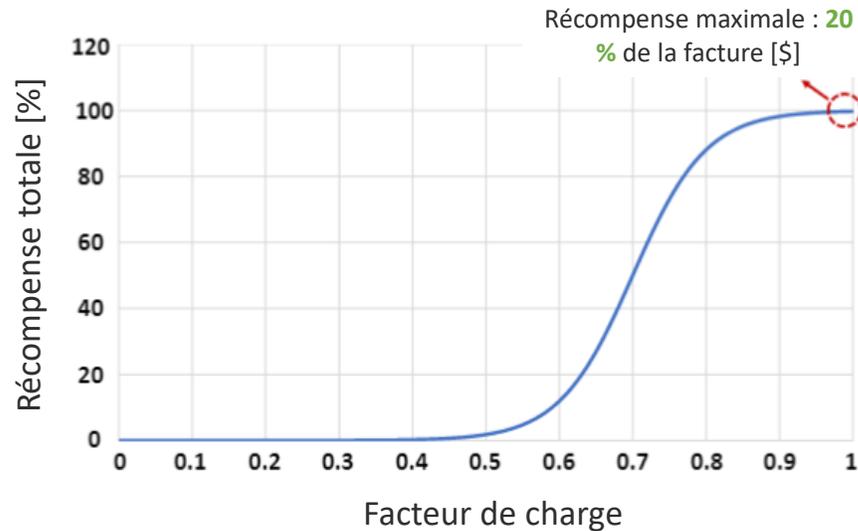


FIGURE 3-5 Fonction de récompense totale payée par l'agrégateur au coordinateur.

où $R_{rate} = 20\%$ représente le taux de récompense totale sous forme de remise sur la facture payée par l'agrégateur; on suppose que la remise maximale sur la facture agrégée du groupe est de 20% de la facture. $C_1 = 20$ et $C_2 = 0.7$ sont des paramètres permettant d'ajuster la forme de la fonction de récompense. La négociation entre l'agrégateur et le coordinateur détermine R_{rate} , C_1 , et C_2 .

Selon la fonction de récompense proposée, exprimée par (3.16), pour des facteurs de charge égaux ou inférieurs à 0.4, l'agrégateur ne paie aucune récompense. Néanmoins, pour $0.4 < LF < 1$, la récompense sera payée en fonction du LF du profil agrégé associé par (3.16). La récompense maximale sera payée en $LF = 1$, soit 20% de la facture. Le voisinage reçoit la récompense en fonction de sa flexibilité à modifier le profil agrégé pour améliorer le facteur de charge. Il est difficile d'atteindre un LF très élevé (par exemple, $0.9 < LF < 1$), car cela dépend de la flexibilité du groupe et des préférences individuelles. Les préférences individuelles et les niveaux de confort souhaités limitent la flexibilité du voisinage et évitent de dévier des points de consigne/préférences des utilisateurs. Malgré ces limites, le voisinage a suffisamment

de potentiel pour améliorer le facteur de charge du profil agrégé. La récompense totale sera partagée entre les agents par le coordinateur en fonction de leur contribution à la coordination.

3.4.2.4 Mécanisme de partage des récompenses :

Le système HEMS coordonné proposé est modélisé comme un jeu gagnant-gagnant entre les SH du voisinage. En formant une grande coalition, les joueurs collaborent pour satisfaire les objectifs individuels et les objectifs communs et obtenir le gain total maximum. Certains joueurs peuvent contribuer plus que d'autres à la coordination. Par la suite, il est impératif de mesurer la contribution de chaque joueur à la coordination et de déterminer ainsi l'importance de chacun lors de la distribution du montant total du gain. Ensuite, le gain total peut être partagé en conséquence entre les joueurs. Le mécanisme de partage des gains présenté a été conçu sur la base du concept des "Valeurs de Shapley" [168].

Le jeu de coalition comprend un ensemble de N joueurs et une fonction v qui fait correspondre des sous-ensembles de joueurs aux nombres réels. Le montant que le joueur i reçoit dans le jeu de coalition donné (v, \mathbb{C}) est,

$$\varphi_i(v) = \sum_{C \subseteq \mathbb{C} \setminus \{i\}} \left(\frac{|C|!(n - |C| - 1)!}{n!} (v(C \cup \{i\}) - v(C)) \right), \quad (3.17)$$

où la fonction $v : 2^N \rightarrow R$ exprime des fonctions caractéristiques, n définit le nombre total de SH (joueurs), \mathbb{C} représente l'ensemble de toutes les coalitions possibles de joueurs, C énonce les sous-ensembles de toutes les coalitions de joueurs, $|C|$ symbolise la cardinalité du sous-ensemble C , $v(C)$ présente l'évaluation (valeur) de la coalition C , et la somme s'étend sur tous les sous-ensembles de coalition C de \mathbb{C} ne contenant pas le joueur i . La fonction $v(C)$ signifie que dans une coalition C donnée, la somme totale attendue des gains que les membres de C acquièrent par la coordination est égale à $v(C)$.

La procédure de partage des récompenses s'analyse comme suit. Tout d'abord, toutes les coalitions réalisables sont formées par un joueur à chaque fois, et le joueur demande sa contribution $v(C \cup \{i\}) - v(C)$ comme équilibre équitable. Ensuite, la moyenne de la contribution est prise sur les permutations réalisables dans lesquelles la coalition peut être

créée pour chaque joueur. La formule équivalente pour la valeur de Shapley peut être écrite comme suit :

$$\varphi_i(v) = \frac{1}{n} \sum_{C \subseteq \mathbb{C} \setminus \{i\}} \left(\binom{n-1}{|C|}^{-1} (v(C \cup \{i\}) - v(C)) \right) \quad (3.18)$$

L'idée principale du processus (3.18) peut être décrit comme suit.

$$\varphi_i(v) = \frac{1}{n} \sum_{\mathbb{C} \setminus \{i\}} \frac{\text{contribution marginale de } i \text{ à } C}{\text{coalitions nombre exception } i \text{ de cette taille}}. \quad (3.19)$$

Pour quantifier la valeur de la coalition C (3.19), la fonction caractéristique v est conçue comme suit

$$v(C) = \frac{\|U^{CR} - U^{NCR}\|_2^2}{v_{C_N}}, \quad (3.20a)$$

$$v_{C_N} = \left\| U_{C_N}^{CR} - U_{C_N}^{NCR} \right\|_2^2, \quad (3.20b)$$

où $U = \sum_{i=1}^N u_i$ représente le profil agrégé (coalition), U^{NCR} indique le profil agrégé sans appliquer la coordination, U^{CR} exprime le profil agrégé après la coordination, et v_{C_N} désigne la valeur de la grande coalition C_N . $U_{C_N}^{CR}$ et $U_{C_N}^{NCR}$ présentent les profils agrégés après et avant application de la coordination pour la grande coalition, respectivement. Selon (3.20a) et (3.20b), la fonction caractéristique est normalisée comme $0 \leq v(C) \leq 1$.

Le mécanisme de partage de récompense proposé possède les propriétés suivantes.

- Efficacité : La somme des parts (valeurs de Shapley) de tous les joueurs est égale à la valeur de la grande coalition, et le montant total du gain de la grande coalition est attribué aux joueurs sans aucune perte. Cela est illustré par,

$$\sum_{i \in N} \varphi_i(v) = v(C_N), \quad (3.21)$$

où C_N représente la grande coalition avec la participation de tous les N joueurs. $v(C)$ est conçu pour mesurer la valuation des coalitions de manière équitable (3.20a). La fonction v dans (3.21) mesure les changements de profil pour suivre les variables globales partagées par le coordinateur. Par la suite, elle est utilisée pour calculer la contribution des joueurs à la coordination et, par conséquent, les parts des joueurs ($\varphi_i(v)$) du gain total.

- **Rationalité individuelle** : Les joueurs de la coordination sont individuellement rationnels afin de garantir que tous les joueurs choisissent leur meilleure action en fonction de leurs préférences. Aucun joueur ne perd d'argent en participant à la grande coalition. La rationalité individuelle protège les joueurs d'une détérioration monétaire des comportements stratégiques et des pouvoirs de négociation des autres joueurs.
- **Joueur nul** : Dans un jeu donné (v, \mathbb{C}) , un joueur est appelé joueur nul si sa valeur Shapley est zéro. En fait, un joueur i est nul dans un jeu donné (v, \mathbb{C}) si $v(C \cup \{i\}) = v(C)$ pour toutes les coalitions C qui n'incluent pas le joueur i .
- **Symétrie** : Dans un jeu donné (v, \mathbb{C}) , si le joueur i et le joueur j ont la même contribution et sont similaires au sens de $v(C \cup \{i\}) = v(C \cup \{j\})$ pour tous les sous-ensembles possibles C de \mathbb{C} qui n'inclut ni i ni j , alors les valeurs de Shapley de ces joueurs sont égales car $\phi_i(v) = \phi_j(v)$.

3.4.2.5 Mécanisme compatible avec les incitations (compatibilité des incitations) :

Dans l'approche de coordination, le problème critique de la résolution du problème d'optimisation associé concernant les données des joueurs indépendants est qu'ils peuvent ne pas déclarer leurs informations de manière véridique. Dans l'optimisation basée sur les contraintes, un joueur peut obtenir des avantages significatifs en déclarant un coût élevé et, par conséquent, obtenir une solution qui pondère ses critères plus fortement que les autres. Ce résultat peut être compensé en garantissant le concept d'incitation compatible (IC) si chaque participant peut obtenir le résultat le plus profitable en opérant sur la base de ses préférences valides. Ce travail conçoit et ajoute un mécanisme compatible avec les incitations à l'approche HEMS coordonnée proposée pour garantir la véracité des déclarations des consommateurs.

Le mécanisme compatible avec les incitations proposé encourage les joueurs à déclarer leur profil de consommation optimal réel au coordinateur. Plus précisément, deux procédures ont été conçues pour garantir la compatibilité des incitations. Comme expliqué dans (3.20), le profil agrégé de chaque coalition possible avant d'appliquer la coordination (U^{NCR}) et après avoir appliqué l'approche (U^{CR}), ont été utilisés pour quantifier les fonctions de valeur des coalitions. Par conséquent, les procédures visent à garantir la compatibilité des incitations concernant U^{NCR} et U^{CR} . Dans le mécanisme de partage des récompenses prévu, la part de

chaque joueur (fonctions de valorisation des coalitions et valeurs de Shapley) est calculée et mise à jour dans le processus de facturation en utilisant le profil de consommation d'énergie réel des coalitions (U^{CR}) à la fin de la journée. Par conséquent, les parts des joueurs sont liées à leurs profils réels plutôt qu'aux profils déclarés.

De plus, une autre procédure a également été conçue pour assurer la compatibilité des incitations concernant U^{NCR} en limitant les connaissances des joueurs lors de la première itération du processus de négociation répétitif avec le coordinateur. Les informations partagées envoyées par le coordinateur aux joueurs forment leur connaissance, y compris la demande du coordinateur (profils individuels souhaités) auprès des consommateurs. Prenons l'exemple suivant pour clarifier l'idée : le coordinateur demande à tous les clients d'aplatir leurs profils individuels et de recevoir une récompense basée sur le montant de la révision de leur profil. Les efforts des joueurs représentent la différence entre leurs profils avant et après la DR. Dans ce cas, les joueurs connaissent déjà l'objectif du coordinateur et peuvent se préparer à un faux rapport. Par conséquent, les joueurs peuvent déclarer leurs profils exacts avant la DR de manière mensongère avec des valeurs plus élevées pour simuler leur niveau d'effort et augmenter leurs bénéfices en conséquence. Cela est possible parce que chaque joueur sait déjà que son avantage peut augmenter en aplatissant son profil. Au contraire, dans l'approche de coordination proposée, le coordinateur conduit les joueurs à des actions complémentaires. En effet, l'objectif du coordinateur et le profil demandé à chaque joueur sont variables. Par exemple, le coordinateur demande à un joueur de faire un pic à un moment spécifique et demande à un autre joueur d'aplatir le pic. L'approche prévue crée un profil agrégé aplati en agrégeant des profils individuels complémentaires au lieu d'aplatir les profils de tous les consommateurs individuellement et de les agréger ensuite. Ainsi, les joueurs ne connaissent pas le profil souhaité par le coordinateur et ne peuvent pas envoyer un rapport mensonger de leur profil avant la DR pour en obtenir des avantages. En fait, lors de la première itération du processus de négociation entre le joueur et le coordinateur (pendant la coordination), le coordinateur demande les profils des joueurs avant la DR sans leur dire le profil souhaité dans les itérations suivantes. Cette limitation de l'information empêche les joueurs d'être préparés à la fraude et les rend incertains de gagner des profits avec de faux rapports. Les consommateurs ne possèdent pas d'informations solides et fiables pour s'assurer qu'ils gagnent des bénéfices

avec des rapports non véridiques de leurs profils sans DR. Par conséquent, la meilleure action des joueurs est d'être honnête sur leur profil avant DR pour augmenter leurs bénéfices.

3.4.2.6 *Mécanisme de facturation et échancier de coordination :*

Un mécanisme de facturation a été conçu pour convaincre les consommateurs de programmer leurs EBH de manière efficace et suit le coordinateur pour atteindre les objectifs individuels/partagés. La Figure 3-6 montre le mécanisme de facturation et la chronologie de la coordination. À la fin de la journée, le mécanisme de facturation facture équitablement les clients pour leur consommation d'énergie et distribue des parts de récompense en fonction de leur contribution pendant la coordination.

En outre, le calendrier de coordination met en évidence la procédure de coordination et la divise en deux phases. La première phase comprend la planification au début de la journée, et la seconde la facturation à la fin de la journée.

Dans la première phase, le coordinateur tente de négocier avec les consommateurs pour parvenir à un accord global et communique ensuite la récompense totale attendue et les parts des clients. Le coordinateur et les joueurs se mettent d'accord sur des plans de profil de consommation pour la journée au cours de cette phase.

Dans la deuxième phase, le coordinateur utilise les données mesurées par les compteurs intelligents pour recalculer la récompense totale et les parts des consommateurs sur la base de leurs profils réels au lieu des profils déclarés en début de journée. Le mécanisme de facturation garantit la compatibilité des incitations comme expliqué dans la sous-section 3.4.2.

3.4.2.7 *Mise en oeuvre de l'algorithme :*

L'algorithme élabore la procédure détaillée de l'approche proposée pour mettre en oeuvre Les HEMS coordonnés en établissant un consensus et en partageant des objectifs communs. La procédure de l'approche de coordination proposée a été résumée dans l'algorithme.

Dans cette approche de coordination, nous décomposons un problème de coordination grand, complexe et centralisé en plusieurs sous-problèmes plus simples. Cela permet de résoudre le problème de manière distribuée dans plusieurs processeurs. Chaque agent (HEMS) résout son problème d'optimisation localement de manière parallèle et échange ensuite ses

Algorithm La technique de coordination des HEMS proposée

- 1: **Initialiser** : $k \leftarrow 0$, Le coordinateur initialise CR , u_i^k , \bar{Z}^k , et λ^k . Chaque HEMS reçoit le prix de l'électricité π et la prévision météorologique $w_i(t)$. Les HEMS initialisent $T_i^{u_i}$, δ_{set} , $u_i^{EBH}(t)$, Ψ_i^A , Ψ_i^B , et Ψ_i^C .
 - 2: **repeat**
 - 3: Les HEMS résolvent leur problème local (3.13a) et envoient leur décision mise à jour u_i^{k+1} au coordinateur. Lors de la première itération, ils envoient au coordinateur des profils de base planifiés pour le jour suivant (sans participer au programme de réponse à la demande).
 - 4: Le coordinateur collecte tous les u_i^{k+1} et calcule \bar{u}^{k+1} .
 - 5: Le coordinateur résout son problème de coordination (3.13b) pour satisfaire les objectifs partagés.
 - 6: Le coordinateur met à jour les variables globales (3.13b) (\bar{Z}^{k+1}).
 - 7: Le coordinateur met à jour les variables duales (3.13c) (λ^{k+1}).
 - 8: $k \leftarrow k + 1$
 - 9: **until** convergence vers un consensus (ou satisfaction des critères d'arrêt ou atteinte de l'itération maximale)
 - 10: Le coordinateur calcule le gain total attendu de l'équipe (3.16) et la part de chaque consommateur (3.18).
 - 11: Le coordinateur rapporte le gain total et les parts prévus.
 - 12: Le coordinateur observe la consommation des consommateurs. Sur la base des données des compteurs intelligents, il recalcule le gain total et les parts à la fin de la journée.
 - 13: Mécanisme de facturation.
-

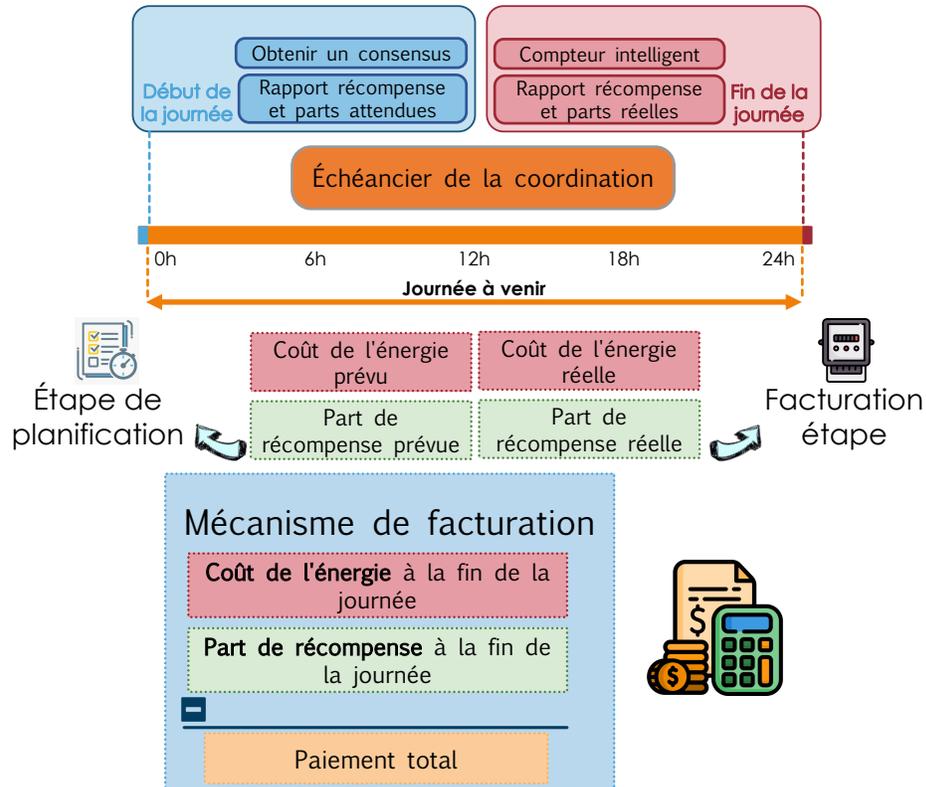


FIGURE 3-6 Mécanisme de facturation et échéancier de coordination.

décisions avec le coordinateur. Le coordinateur échange les données (variables globales et variables duales) et partage les objectifs communs entre les agents. Le processus proposé pour la coordination a été résumé dans la Figure 3-7.

Le deuxième niveau d'optimisation coordonne les HEMS afin d'atteindre les objectifs communs et de partager les récompenses de manière équitable entre les agents. Ceci sera mis en œuvre par notre technique de coordination suggérée, la politique d'incitation et le mécanisme de partage des récompenses. Enfin, le dernier niveau d'optimisation fournit l'optimisation à l'intérieur de chaque HEMS pour garantir leurs objectifs individuels, y compris la minimisation des coûts, la maximisation du confort et la maximisation des récompenses. L'algorithme de coordination proposé partage les objectifs communs entre les HEMS du voisinage. Les fonctions objectives du coordinateur et des HEMS individuels sont présentées dans la Figure 3-8. Comme expliqué par (3.4.1), la Figure 3-7, et la Figure 3-8, les objectifs individuels comprennent deux termes : c_i et d_i . Dans la fonction de coût de chaque HEMS, le terme $c_i^{u_i} = \sum_{h=1}^H \pi u_i(t)$ garantit la minimisation des coûts énergétiques du ménage. Le terme $d_i^{u_i}(t) =$

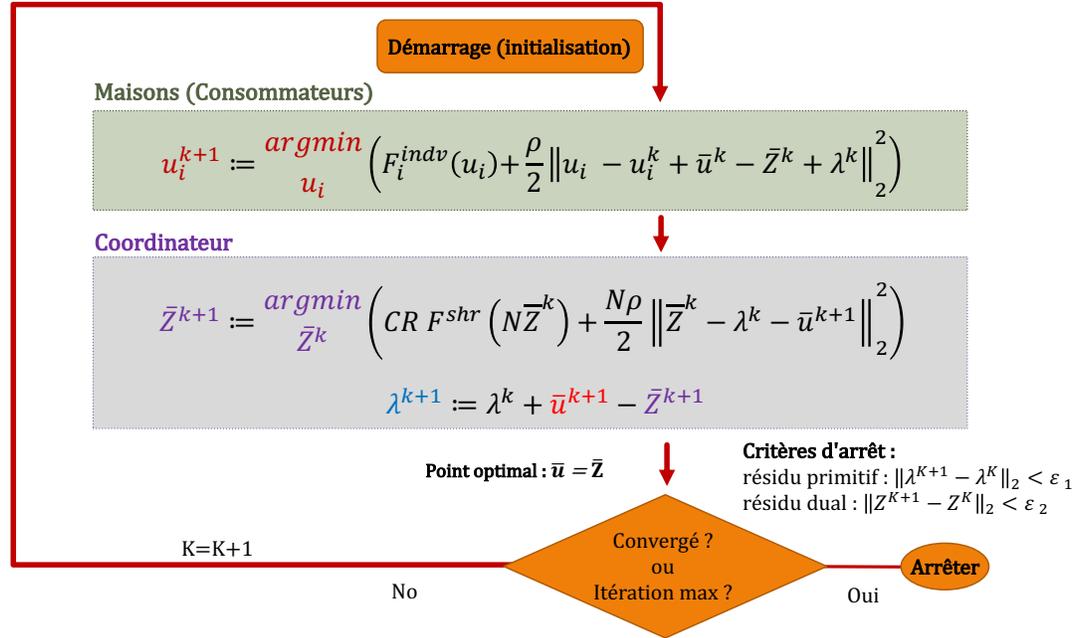


FIGURE 3-7 L'algorithme de coordination HEMS proposé

Coordination des HEMSs : les Fonctions Objectifs

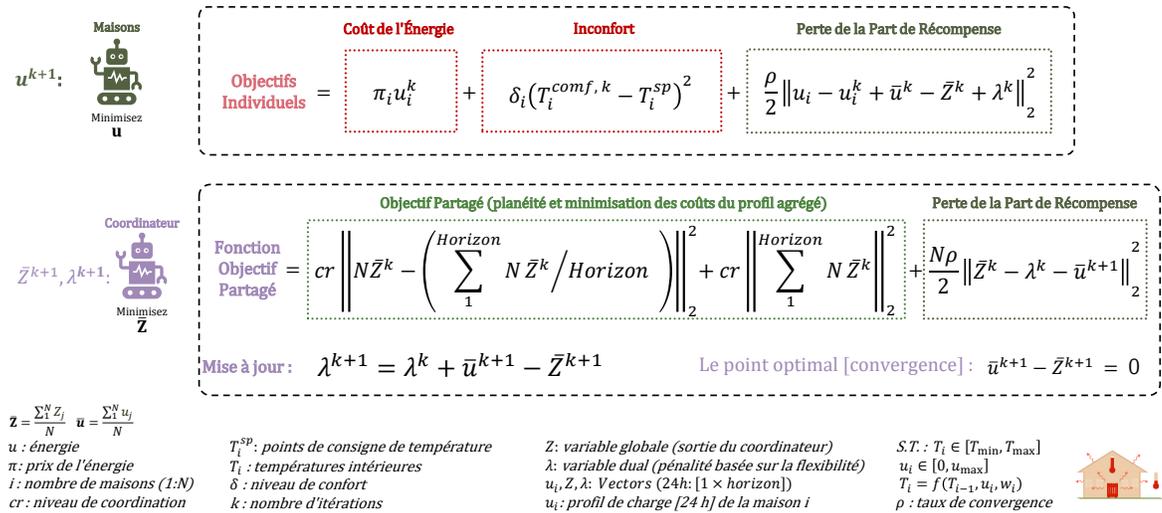


FIGURE 3-8 Les fonctions objectives proposées pour le coordinateur et les HEMS.

$\delta_i(t) (T_i^{\text{comf}}(t) - T_i^{ui}(t))^2$ modélise l'inconfort de l'utilisateur et tente de le minimiser en maintenant la température intérieure proche du point de consigne. En réglant le paramètre δ , le client peut modifier le niveau de flexibilité du système de chauffage, et déterminer le niveau d'importance que la température intérieure soit proche de la valeur de consigne. Le

terme $\frac{\rho}{2} \left\| u_i - u_i^k + \bar{u}^k - \bar{Z}^k + \lambda^k \right\|_2^2$ modifie le comportement de l'agent en se basant sur les signaux reçus du coordinateur et minimise la possibilité de perdre la part de la récompense totale. Dans la fonction de coût du coordinateur, $CR \left\| N\bar{Z} - \left(\sum_1^{Horizon} \frac{N\bar{Z}}{Horizon} \right) \right\|_2^2$ améliore le facteur de charge du profil agrégé. Le terme $CR \left\| \sum_1^{Horizon} N\bar{Z} \right\|_2^2$ minimise la consommation totale d'énergie (coût totale) dans le voisinage. Le paramètre cr détermine l'importance des objectifs partagés par rapport aux objectifs individuels. Le paramètre cr peut modifier le niveau d'amélioration du LF et donc le niveau de la récompense totale reçue. $\frac{N\rho}{2} \left\| \bar{Z} - \lambda^k - \bar{u}^{k+1} \right\|_2^2$ est le terme de coordination et minimise la perte de la récompense totale. Après la mise à jour de d_i par les HEMS, le coordinateur collecte toutes les valeurs actualisées, puis met à jour \bar{u} , \bar{Z} et λ , et les envoie à tous les agents. Ce processus sera répété jusqu'à atteindre l'itération maximale ou le point optimal ($\bar{u}^{k+1} = \bar{Z}^{k+1}$). Un critère d'arrêt a été conçu pour arrêter le processus pour la réponse optimale souhaitée avant d'atteindre l'itération maximale. Une fois le processus de coordination terminé, le coordinateur reçoit de l'agrégateur la récompense totale du groupe en fonction du facteur de charge du profil de consommation agrégé. Ensuite, le coordinateur divise et partage la récompense totale entre les agents en mesurant combien ils suivent le coordinateur.

Chapitre 4 - Coordination hiérarchique des HEMS

La coordination hiérarchique et transactionnelle des systèmes de gestion de l'énergie domestique (HEMS) permet de relever des défis tels que les pics de rebond, les instabilités et les contingences dans le système de distribution. La mise en œuvre de la coordination dans un cadre hiérarchique à plusieurs niveaux permet de relever les défis du réseau dans différentes couches du système de distribution. Ce chapitre vise à concevoir une approche transactive de coordination hiérarchique multi-niveaux des HEMS avec des thermostats de plinthes électriques sur un marché monopolistique. Ce travail étudie le processus de coordination hiérarchique dans une société comprenant plusieurs groupes résidentiels et élabore les interactions entre les consommateurs, les coordinateurs locaux et le coordinateur du réseau associé. Le cadre hiérarchique, du plus bas au plus haut niveau, comprend respectivement les clients, les coordinateurs de groupes résidentiels pour chaque groupe et un coordinateur du réseau pour la société. La coordination hiérarchique répond aux objectifs/contraintes des utilisateurs, et aux objectifs/contraintes partagés des coordinateurs locaux et du coordinateur du réseau. Un mécanisme a été conçu pour distribuer les objectifs partagés des coordinateurs locaux et du coordinateur du réseau entre les clients afin de mitiger les défis spécifiques à chaque niveau de la société. Un mécanisme de partage des contraintes couplées a été conçu pour relier les niveaux supérieurs et inférieurs et satisfaire les contraintes couplées en révisant les décisions des utilisateurs. En outre, un mécanisme de partage des gains a été conçu pour distribuer équitablement le gain total du niveau le plus élevé de la hiérarchie aux consommateurs du niveau le plus bas. L'efficacité et la fonctionnalité de l'approche de coordination hiérarchique et transactionnelle des HEMS présentée ont été examinées pour différentes études de cas.

Cependant, une coordination hiérarchique multi-niveaux des HEMS est nécessaire pour

gérer les défis à différents niveaux du système de distribution, et pas seulement à un niveau spécifique comprenant un groupe résidentiel. En effet, au moins deux niveaux de coordination sont nécessaires : le niveau supérieur (coordinateurs du réseau) et le niveau inférieur (coordinateurs locaux des groupes résidentiels). Le coordinateur de niveau supérieur tente de coordonner les coordinateurs de niveau inférieur dans les groupes résidentiels. Chaque coordinateur de niveau inférieur gère un ensemble de maisons intelligentes (SH) dans un groupe résidentiel. En outre, la coordination hiérarchique des HEMS diminue la quantité de calculs aux niveaux supérieurs de la hiérarchie. Les plinthes électriques représentent la plus grande partie de la consommation d'électricité dans les régions froides comme le Québec, en raison de leurs hivers rigoureux. Par conséquent, il est nécessaire d'envisager une coordination hiérarchique à plusieurs niveaux des systèmes HEMS avec les thermostats résidentiels dans le système de distribution.

4.0.1 Principales contributions

Bien que plusieurs travaux aient été réalisés sur les systèmes HEMS non coordonnés uni-niveau, les systèmes HEMS coordonnés uni-niveau et les systèmes HEMS non coordonnés multi-niveaux, une étude approfondie est nécessaire pour concevoir et étudier la coordination des systèmes HEMS hiérarchiques à plusieurs niveaux. Les caractéristiques qui n'ont pas été étudiées dans les travaux précédents de la littérature sont résumées comme suit.

- Les travaux précédents n'ont pas distribué les objectifs partagés entre les groupes résidentiels et, par conséquent, entre leurs HEMS correspondants. Les actions complémentaires des groupes et les actions complémentaires des HEMS dans chaque groupe à travers un cadre distribué multi-niveaux (hiérarchique) basé sur le consensus et le partage n'ont pas été étudiées dans la littérature.
- Les travaux antérieurs n'ont pas étudié un mécanisme permettant de distribuer les contraintes couplées de la société entre les coordinateurs des groupes résidentiels et les HEMS pour relier les niveaux supérieurs et inférieurs.
- De plus, les travaux précédents n'ont pas conçu le partage des gains, les actions complémentaires entre les groupes résidentiels de la société, et les actions complémentaires des HEMS dans un groupe commun.

Le travail présenté dans ce chapitre est motivé par les améliorations potentielles des HEMS à un seul niveau coordonné et vise à aborder les limitations de la coordination à un seul niveau mentionnées ci-dessus en proposant une approche de coordination HEMS multi-niveaux. Les principales contributions de ce chapitre sont les suivantes :

- Proposer un mécanisme pour distribuer les contraintes couplées de la société entre les coordinateurs des groupes résidentiels et diffuser ensuite les contraintes couplées des groupes résidentiels entre leurs HEMS correspondants. Le mécanisme relie les niveaux supérieurs et inférieurs et satisfait les contraintes de la société et des groupes, telles que la capacité énergétique maximale.
- Modéliser la coordination des agents hiérarchiques à plusieurs niveaux et leurs interactions pour partager les objectifs de la société entre les groupes et ensuite distribuer les objectifs des groupes entre les consommateurs. La coordination conduit à des actions complémentaires des groupes et des clients.
- Proposer un mécanisme de partage des gains pour distribuer le gain total de la société entre les groupes résidentiels et ensuite distribuer le gain total du groupe entre les SH associées. Le mécanisme de partage des gains mesure la contribution de chaque consommateur participant et répartit les parts de manière équitable.

4.1 Cadre et modèle du système

La Figure 4-1 illustre une société de consommateurs coordonnés (HEMS) qui comprend N_{CR} coordinateurs locaux et un coordinateur du réseau. Chaque coordinateur local gère N_H SH situées dans le même groupe résidentiel n_{CR} . La coordination entre les N_{CR} coordinateurs locaux est traitée par le coordinateur du réseau n_{GCR} . En outre, chaque agrégateur est connecté à N_{GCR} coordinateurs du réseau. La Figure 4-1 représente la topologie qui a été utilisée pour mettre en œuvre la technique de coordination hiérarchique multi-niveaux proposée dans ce travail. Comme le montre la Figure 4-1, ce travail étudie le processus de coordination hiérarchique dans la société et élabore les interactions entre les consommateurs, les coordinateurs locaux et son coordinateur du réseau associé.

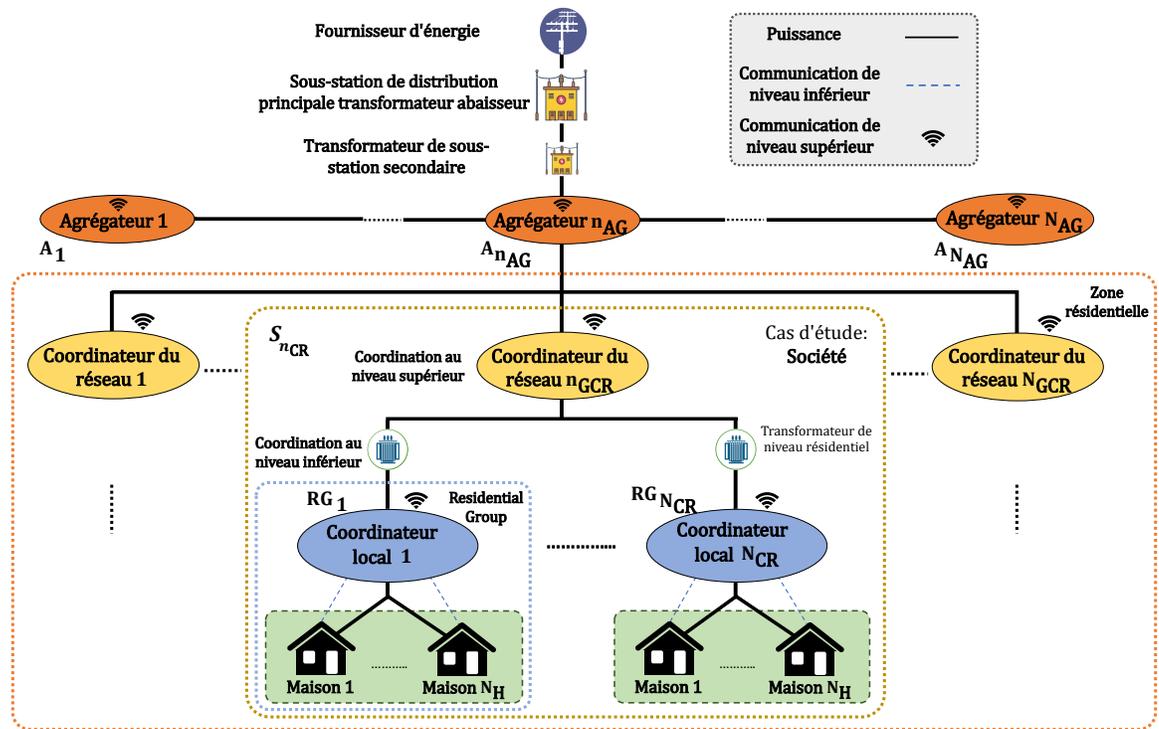


FIGURE 4-1 Le diagramme de blocs de la société coordonnée des consommateurs

4.1.1 Horizon temporel

Dans ce travail, la longueur de l'horizon temporel est de 24 h, et 10 min a été choisi comme temps d'échantillonnage. Par conséquent, la longueur de l'horizon temporel a été représentée par $H = 144$, et l'intervalle de temps peut être représenté par $[1, H]$.

4.1.2 Modèle des charges du consommateur

Chaque ménage possède des charges programmables (flexibles) et non programmables (fixes). Les plinthes chauffantes (BH) sont considérées comme des charges flexibles des clients. Elles sont contrôlées par des thermostats intelligents pour satisfaire les préférences des utilisateurs ; elles-mêmes modélisées à l'aide de niveaux de confort et de points de consigne souhaités pendant la journée. Les préférences spécifient le niveau de flexibilité du client pour participer à un programme de réponse à la demande. Par ailleurs, les charges fixes ne peuvent pas être programmées et sont modélisées en fonction des activités des consommateurs, de leur occupation et de leurs habitudes de consommation d'énergie. Les profils quotidiens des charges fixes sont modélisés en utilisant les données expérimentales des charges non

programmables des ménages mesurées et enregistrées pendant trois mois au Québec. Le processus vise à construire des profils de consommation stochastiques des charges fixes. Le profil de consommation totale de chaque ménage peut être modélisé comme suit,

$$u^T = u^{BH} + u^{FL}, \quad (4.1)$$

où u^T représente la consommation totale d'énergie du ménage, u^{BH} indique la consommation d'énergie de la plinthe électrique de la maison, et u^{FL} désigne la consommation des charges fixes. La dynamique de la plinthe électrique de la maison est modélisée par le modèle thermique linéaire suivant.

$$T(h+1) = \Psi^A T(h) + \Psi^B u^{BH}(h) + \Psi^C T_{out}(h), \quad (4.2)$$

que Ψ^A , Ψ^B , et Ψ^C présentent les paramètres des coefficients thermiques de la maison. T exprime la température intérieure, T_{out} indique la température extérieure, et h représente le temps d'échantillonnage (10 minutes). La dépendance de la température intérieure dans la tranche de temps $h+1$ à la température intérieure, au profil énergétique du chauffage et à la température extérieure dans la tranche de temps t a été définie par Ψ^A , Ψ^B , et Ψ^C , respectivement. Cette étude calcule les paramètres thermiques à partir de données expérimentales provenant de maisons unifamiliales isolées situées à Trois-Rivières, Québec, Canada. Chaque ménage possède des plinthes chauffantes régies par des thermostats. La température intérieure, la température extérieure et la consommation énergétique des chauffages ont été mesurées et enregistrées de janvier à avril 2018. La technique de régression ridge a été employée pour estimer les paramètres thermiques pour toutes les maisons. L'ensemble des maisons instrumentées comprend des types de bâtiments variantes avec différentes caractéristiques telles que la taille (surfaces), les chauffages de piscine, le spa, le nombre d'occupants, les thermostats, les étages et les chambres.

4.1.3 Inconfort des occupants

La fonction d'inconfort des occupants de chaque ménage est modélisée comme suit,

$$d(h) = \delta(h) (T^{\text{comf}}(h) - T(h))^2, \quad (4.3)$$

où d représente l'inconfort des occupants, le terme T^{comf} définit la température intérieure souhaitée, et δ désigne les niveaux de confort pendant une journée. d , T , T^{comf} , et δ sont des vecteurs de longueur H . Les occupants sélectionnent δ dans l'ensemble $\delta_{\text{set}} = \{\delta_{\text{min}}, \delta_{\text{max}}\}$ pour choisir entre le mode économique et le mode confort pour chaque tranche de temps. δ_{max} exprime que les occupants sont intéressés par le mode confort et se rapprochent du point de consigne. Au contraire, δ_{min} indique que les occupants sont intéressés par le mode économique et que la température intérieure peut être différente du point de consigne. Chaque agent HEMS ajuste la température intérieure en respectant les contraintes,

$$T \in [T^{\text{min}}, T^{\text{max}}], \quad (4.4)$$

$$T^{\text{min}} = T^{\text{comf}} - T^{\text{sp}}, \quad (4.5)$$

$$T^{\text{max}} = T^{\text{comf}}, \quad (4.6)$$

$$\delta_{\text{min}} = 0, \quad (4.7)$$

$$u^{BH} \in [u^{BH,\text{min}}, u^{BH,\text{max}}], \quad (4.8)$$

$$u^T \in [u^{T,\text{min}}, u^{T,\text{max}}], \quad (4.9)$$

que T^{min} et T^{max} désignent les températures intérieures minimales et maximales admissibles, respectivement. $u^{BH,\text{min}}$ et $u^{BH,\text{max}}$ désignent respectivement l'énergie minimale et maximale acceptables des BHs (chauffages). $u^{T,\text{min}}$ et $u^{T,\text{max}}$ représentent respectivement l'énergie minimale et maximale admissibles du ménage. La plage de température intérieure de consigne des maisons pour la saison hivernale a été caractérisée à l'aide de données historiques du Centre Canadien d'Hygiène et de Sécurité au Travail. La plage de température intérieure de consigne donnée est de 20 – 23 °C. La distribution de T^{sp} , T^{comf} , et δ pour construire un ensemble de préférences stochastiques des consommateurs a été modélisée sur la base des données expérimentales de nos précédents articles [167], [169]. Comme l'illustre (4.10)-(4.14), T^{sp} peut prendre des valeurs au hasard dans l'ensemble $T_{\text{set}}^{\text{sp}}$ dans C^0 avec les probabilités $P(T^{\text{sp}})$. En plus, T^{comf} peut prendre des valeurs au hasard dans l'ensemble $T_{\text{set}}^{\text{comf}}$ dans C^0

avec les probabilités $P(T^{\text{comf}})$.

$$T^{\text{comf}} \in T_{\text{set}}^{\text{comf}} = \{20, 21, 22, 23\}[C^o], \quad (4.10)$$

$$P(T^{\text{comf}}) = [0.1, 0.3, 0.5, 0.1][C^o] \quad (4.11)$$

$$T^{\text{sp}} \in T_{\text{set}}^{\text{sp}} = \{1, 2, 3, 4\}[C^o], \quad (4.12)$$

$$P(T^{\text{sp}}) = [0.1, 0.3, 0.4, 0.2][C^o] \quad (4.13)$$

Le niveau de confort maximal (δ_{max}) est généré aléatoirement en utilisant une distribution log-normale avec la variance et l'espérance suivantes,

$$\text{Var}(\delta_{\text{max}}) = 1, \quad \mathbb{E}(\delta_{\text{max}}) = 5, \quad (4.14)$$

4.1.4 Groupe résidentiel et société

Le système de distribution considéré dans ce chapitre est divisé conceptuellement en trois niveaux et les nomme comme suit : groupe résidentiel, société et zone résidentielle. Comme l'illustre la Figure 4-1, chaque zone résidentielle est constituée de N_{GCR} sociétés (coordinateurs du réseau), chaque société possède N_{CR} groupes résidentiels (coordinateurs du réseau), enfin chaque groupe résidentiel comprend N_H maisons. Cette étude se concentre sur la coordination hiérarchique dans la société et considère que chaque groupe résidentiel comprend au maximum 15 SH ($N_H = 15$). Chaque groupe résidentiel appartient à une seule société, et chaque ménage appartient à un seul groupe résidentiel,

$$S_f \cap S_g = \emptyset, \quad \forall f \neq g, \quad (4.15)$$

$$RG_f \cap RG_g = \emptyset, \quad \forall f \neq g, \quad (4.16)$$

où S_f, S_g, RG_f et RG_g désignent respectivement la société f , la société g , le groupe résidentiel f et le groupe résidentiel g . L'énergie agrégée des groupes résidentiels de la société S doit respecter la contrainte de capacité de la société comme (4.17), l'énergie agrégée des SH du groupe résidentiel RG_j doit respecter la contrainte de capacité du groupe comme (4.18), et le

profil énergétique total de chaque ménage respecte la limite maximale comme (4.19).

$$\left| \sum_{j=1}^{N_{CR}} \sum_{i=1}^{N_H} u_{ji}^T(h) \right| \leq U_{max}^S, \quad (4.17)$$

$$\left| \sum_{i=1}^{N_H} u_{ji}^T(h) \right| \leq U_{max}^{RG_j}, \quad (4.18)$$

$$|u_{ji}(h)| \leq U_{max}^H, \quad (4.19)$$

que $u_{ji}^T(h)$ symbolise l'énergie totale du ménage i au moment h dans le groupe résidentiel j , qui appartient à la société S . U_{max}^S limite la capacité de la société S , $U_{max}^{RG_j}$ définit la contrainte de capacité du groupe résidentiel j , et U_{max}^H représente la limite maximale d'énergie des maisons. Les contraintes susmentionnées déterminent la limite supérieure d'importation ou d'exportation d'énergie de la société et des groupes résidentiels.

4.2 Formulation du problème et proposition de coordination hiérarchique

Cette section clarifie d'abord le problème principal et les objectifs de chaque consommateur dans un groupe résidentiel. Elle démontre ensuite la coordination des HEMS à un seul niveau dans un groupe résidentiel et formule enfin le cadre de coordination des HEMS hiérarchiques à plusieurs niveaux des groupes résidentiels dans une société.

4.2.1 Problème centralisé

Dans le cas de la gestion centralisée de l'énergie, les problèmes de chaque SH i (agent HEMS), de chaque groupe résidentiel j (agent coordinateur local) et de la société S sont formulés comme suit (4.20) - (4.22),

$$\begin{aligned} & \underset{u_{ji}^T}{\text{minimize}} \quad \sum_{h=0}^H [\pi u_{ji}^T(h) + d_{ji}(h)], \\ & \text{s.t. : } (4.1) - (4.14), \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\underset{u_{ji}^T}{\text{minimize}} \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{h=0}^H [\pi u_{ji}^T(h) + d_{ji}(h)], \quad (4.21)$$

$$s.t. : (4.1) - (4.18) \setminus \{(4.15), (4.17)\},$$

$$\underset{u_{ji}^T}{\text{minimize}} \sum_{j=1}^{N_{CR}} \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{h=0}^H [\pi u_{ji}^T(h) + d_{ji}(h)], \quad (4.22)$$

$$s.t. : (4.1) - (4.18),$$

où π désigne le prix de l'électricité, qui est le tarif le plus élevé du tarif fixe d'Hydro-Québec D [170] (consommateurs domestiques et maisons), et est égal à 10 ϕ/kWh .

Le problème (4.20) minimise la facture d'électricité de chaque ménage et maximise le confort des occupants. L'équation (4.21) garantit l'efficacité et le confort d'un groupe résidentiel. Enfin, la minimisation de la facture et le confort de toutes les ménages situées dans la société sont assurés dans (4.22). Le problème (4.22) satisfait uniquement les objectifs individuels de toutes les SH et ne tente pas de prendre en compte les objectifs partagés de la société. Pourtant, des objectifs partagés peuvent être pris en compte et conçus dans la société pour atténuer les défis du réseau local et soulager la pression sur le système de distribution. Dans ce travail, les défis sociaux sont d'améliorer le facteur de charge du profil agrégé de la société et de minimiser la consommation agrégée. Ainsi, des objectifs supplémentaires de la société sont conçus et ajoutés à l'équation (4.22) pour résoudre les défis de la société. L'équation (4.22) peut être réécrite comme suit,

$$\begin{aligned} & \underset{u_{ji}^T}{\text{minimize}} \sum_{j=1}^{N_{CR}} \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{h=0}^H [\pi u_{ji}^T(h) + d_{ji}(h)] \\ & + \left\| \sum_{j=1}^{N_{CR}} \sum_{i=1}^{N_H} u_{ji}^T - \left(\sum_{h=0}^H \frac{\sum_{j=1}^{N_{CR}} \sum_{i=1}^{N_H} u_{ji}^T(h)}{H} \right) \right\|_2^2 \\ & + \left\| \sum_{h=0}^H \sum_{j=1}^{N_{CR}} \sum_{i=1}^{N_H} u_{ji}^T(h) \right\|_2^2, \\ & s.t. : (4.1) - (4.18), \end{aligned} \quad (4.23)$$

que le terme $\left\| \sum_{j=1}^{N_{CR}} \sum_{i=1}^{N_H} u_{ji}^T - \left(\sum_{h=0}^H \frac{\sum_{j=1}^{N_{CR}} \sum_{i=1}^{N_H} u_{ji}^T(h)}{H} \right) \right\|_2^2$ garantit la planéité du profil agrégé de la société et améliore son facteur de charge. Le terme $\left\| \sum_{h=0}^H \sum_{j=1}^{N_{CR}} \sum_{i=1}^{N_H} u_{ji}^T(h) \right\|_2^2$ minimise la consommation totale pendant une journée dans la société. Dans le cas centralisé, la fourniture d'énergie prend les décisions au nom des ménages pour programmer leurs assets flexibles. Comme élaboré précédemment, ce travail propose l'interaction entre les agents pour concevoir une coordination hiérarchique multi-niveaux des HEMS à travers un cadre d'optimisation et de prise de décision distribué.

4.2.2 Coordination distribuée à un seul niveau du groupe résidentiel

Le problème (4.23) peut être réécrit comme un problème basé sur le consensus et le partage centralisé et basé sur ADMM [169],

$$\begin{aligned}
 & \underset{u_i \text{ \& } \bar{Z}}{\text{minimize}} \sum_{i=1}^{N_H} F_i^{ind}(u_i) + cr F^{shr}(N_H \bar{Z}), \\
 & \text{s.t. : } \bar{Z} = \left(\frac{1}{N_H} \right) \sum_{i=1}^{N_H} z_i \text{ \& } u_i - z_i = 0, \\
 & \text{\& (4.1) - (4.18),}
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

que $i \in \{1, \dots, N_H\}$ désigne chaque index de maison dans le groupe résidentiel, \bar{Z} représente la moyenne des variables globales, F_i^{ind} définit les objectifs individuels du ménage i , F^{shr} exprime l'objectif partagé dans le groupe résidentiel, et cr désigne le niveau de coordination pour déterminer l'importance des objectifs partagés par rapport aux objectifs individuels. Le cr prend une valeur comprise entre 0 et 1. La valeur $cr = 1$ maximise le niveau de coordination pour utiliser le potentiel de coordination maximal existant dans le groupe. Cependant, $cr = 0$ représente le cas d'égoïsme et souligne qu'il n'y a pas de coordination entre les agents. Le coordinateur choisit la valeur cr et utilise la flexibilité du groupe pour augmenter le gain total. Le problème (4.24) peut être mis en œuvre par une forme échelonnée d'ADMM basée sur le

partage et le consensus [169] d'une manière distribuée par,

$$u_i^{k+1} := \arg \min_{u_i} (F_i^{ind}(u_i) + \frac{\rho}{2} \|u_i - u_i^k + \Delta_i^k\|_2^2), \quad (4.25)$$

$$\bar{Z}^{k+1} := \arg \min_{\bar{Z}^k} (cr F^{shr}(N_H \bar{Z}^k) + \frac{N_H \rho}{2} \|\Psi^{k+1}\|_2^2), \quad (4.26)$$

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \bar{u}^{k+1} - \bar{Z}^{k+1}, \quad (4.27)$$

où ρ présente le taux de convergence, k indexe les itérations, u_i^k symbolise la décision du ménage i dans l'itération k , \bar{Z}^k indique la moyenne des variables globales, et λ^k définit les variables duales. Δ_i^k représente,

$$\Delta_i^k = \bar{u}^k - \bar{Z}^k + \lambda^k, \quad (4.28)$$

où \bar{u}^k représente la moyenne de toutes les décisions des SH du groupe résidentiel. Ψ^{k+1} représente,

$$\Psi^{k+1} = \bar{Z}^k - \lambda^k - \bar{u}^{k+1} \quad (4.29)$$

La procédure (4.25)-(4.27) partage des objectifs communs entre les agents HEMS du groupe résidentiel, établit un consensus entre eux, et satisfait leurs objectifs individuels. Comme décrit dans (4.25), chaque agent HEMS résout une optimisation convexe pour mettre à jour sa décision de manière distribuée et en parallèle avec les autres. À l'étape suivante, le coordinateur collecte les décisions de tous les agents, calcule la moyenne des décisions des agents (\bar{u}^{k+1}), et calcule \bar{Z}^{k+1} par le biais de (4.26) pour satisfaire les objectifs partagés dans le groupe. Ensuite, le coordinateur met à jour les variables duales par (4.27), et renvoie les variables globales et duales mises à jour aux agents HEMS. Le processus et l'interaction entre le coordinateur et les agents seront répétés jusqu'à ce qu'ils parviennent à un accord global (appelé consensus). Les objectifs partagés ont été conçus pour améliorer le facteur de charge du profil agrégé et minimiser le coût total de l'énergie dans le groupe. En conséquence, les objectifs individuels de chaque HEMS et les objectifs partagés du groupe ont été définis comme suit,

$$F_i^{ind}(u_i) = \sum_{h=0}^H [\pi u_i^T(h) + d_i(h)], \quad (4.30)$$

$$F^{shr}(N_H \bar{Z}) = \left\| N_H \bar{Z} - \left(\sum_{h=0}^H \frac{N_H \bar{Z}_h}{H} \right) \right\|_2^2 + \left\| \sum_{h=0}^H N_H \bar{Z}_h \right\|_2^2, \quad (4.31)$$

que u_i et d_i représentent respectivement la décision (profil énergétique) et l'inconfort de chaque agent.

4.2.3 *Coordination hiérarchique (multi-niveaux) de la société*

Cette section reformule le problème (4.23) comme un cadre de coordination hiérarchique multi-niveaux. La coordination hiérarchique comprend deux niveaux : une coordination de niveau inférieur et une coordination de niveau supérieur. Les interactions entre le coordinateur du réseau, les coordinateurs locaux et les agents (SH) seront mises en œuvre en reliant les niveaux de coordination supérieur et inférieur. Le processus de coordination de la société est le suivant. Premièrement, tous les HEMS des groupes résidentiels résolvent de manière distribuée leurs problèmes d'optimisation individuels, prennent leurs décisions et transmettent la décision mise à jour à leur coordinateur local correspondant. Deuxièmement, les coordinateurs locaux recueillent les décisions des HEMS et résolvent leur problème d'optimisation afin d'atteindre leurs objectifs communs pour mitiger le défi spécifique dans leur groupe résidentiel. Troisièmement, ce processus se poursuit jusqu'à ce que chaque coordinateur local parvienne à un consensus dans son groupe résidentiel associé. Après cela, le coordinateur de la société recueille les décisions des coordinateurs locaux, met à jour l'état de la société (profil agrégé et son facteur de charge), résout son optimisation convexe pour atteindre les objectifs partagés de la société afin d'atténuer les défis de la société, puis met à jour ses variables globales et ses variables duales, et les renvoie aux coordinateurs locaux. Enfin, le processus itératif mentionné ci-dessus se poursuit jusqu'à ce que le coordinateur de la société parvienne à un accord global dans la communauté (parmi les coordinateurs locaux).

4.2.4 Coordination de niveau inférieur

La coordination de niveau inférieur entre les consommateurs de chaque groupe résidentiel est supervisée par le coordinateur local correspondant et est mise en œuvre par (4.32) - (4.34).

$$u_{i,L}^{k+1} := \arg \min_{u_{i,L}} (F_{i,L}^{ind}(u_{i,L}) + \frac{\rho_L}{2} \|u_{i,L} - u_{i,L}^k + \Delta_{i,L}^k\|_2^2), \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_L^{k+1} := \arg \min_{\bar{Z}_L^k} (cr F_L^{shr}(N_H \bar{Z}_L^k) + \frac{N_H \rho_L}{2} \|\Psi_L^{k+1}\|_2^2 \\ + \frac{\rho_G}{2} \|\Omega_{LG}^k\|_2^2), \end{aligned} \quad (4.33)$$

$$\lambda_L^{k+1} = \lambda_L^k + \bar{u}_L^{k+1} - \bar{Z}_L^{k+1}, \quad (4.34)$$

où k représente l'itération, L indexe les variables associées à la coordination de niveau local (niveau inférieur), G liste les variables associées à la coordination de niveau réseau (niveau supérieur), et LG exprime les variables échangées entre les niveaux local et réseau. N_H désigne le nombre de SH dans chaque groupe, ρ_L décrit le taux de convergence dans la coordination de niveau inférieur, ρ_G représente le taux de convergence dans la coordination de niveau supérieur, $i \in \{1, \dots, N_H\}$ symbolise chaque index de maison, $u_{i,L}^k$ désigne la décision du ménage i dans l'itération k de la coordination de niveau inférieur, \bar{Z}_L^k définit la moyenne des variables globales dans l'itération k de la coordination de niveau inférieur, λ_L^k indique les variables duales dans la coordination de niveau inférieur, $F_{i,L}^{ind}$ (représenté dans (4.41)) spécifie les objectifs individuels du ménage i , et F_L^{shr} (représenté dans (4.46)) détermine l'objectif partagé de chaque groupe résidentiel transmis par son coordinateur local correspondant. $\Delta_{i,L}^k$ représente,

$$\Delta_{i,L}^k = \bar{u}_L^k - \bar{Z}_L^k + \lambda_L^k, \quad (4.35)$$

où \bar{u}_L^k représente la moyenne des décisions de toutes les ménages du même groupe. Ψ_L^{k+1} représente,

$$\Psi_L^{k+1} = \bar{Z}_L^k - \lambda_L^k - \bar{u}_L^{k+1} \quad (4.36)$$

Par ailleurs, Ω_{LG}^k se réfère à,

$$\Omega_{LG}^k = N_H \bar{Z}_L^k - N_H \bar{u}_L^k + \Delta_{j,G}^k, \quad (4.37)$$

où $j \in \{1, \dots, N_{CR}\}$ signifie chaque index de coordinateur local et N_{CR} désigne le nombre de coordinateurs locaux dans la société. Ici, Ω_{LG}^k relie les processus de coordination de niveau supérieur (réseau) et de niveau inférieur (local) en considérant $\Delta_{j,G}^k$. $\Delta_{j,G}^k$ exprime,

$$\Delta_{j,G}^k = \bar{u}_G^k - \bar{Z}_G^k + \lambda_G^k, \quad (4.38)$$

où \bar{u}_G^k indique la moyenne de toutes les décisions des coordinateurs locaux dans l'itération k , \bar{Z}_G^k désigne la moyenne des variables globales de la coordination de niveau supérieur, et λ_G^k caractérise les variables duales dans la coordination de niveau supérieur. \bar{Z}_L^k , \bar{Z}_G^k , \bar{u}_L^k et \bar{u}_G^k sont calculés comme suit,

$$\bar{Z}_L^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_H} Z_{i,L}^k}{N_H}, \quad \bar{Z}_G^k = \frac{\sum_{j=1}^{N_{CR}} Z_{j,G}^k}{N_{CR}} \quad (4.39)$$

$$\bar{u}_L^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_H} u_{i,L}^k}{N_H}, \quad \bar{u}_G^k = \frac{\sum_{j=1}^{N_{CR}} u_{j,G}^k}{N_{CR}} \quad (4.40)$$

que $Z_{i,L}^k$ représente la variable globale de la coordination de niveau inférieur relative à la maison i dans l'itération k , $Z_{j,G}^k$ représente la variable globale de la coordination de niveau supérieur associée au coordinateur local j , $u_{i,L}^k$ caractérise la décision du ménage i au sein de la coordination locale dans l'itération k , et $u_{j,G}^k$ symbolise la décision du coordinateur local j . $F_{i,L}^{ind}$ représente,

$$F_{i,L}^{ind}(u_{i,L}) = \sum_{h=1}^H \pi(u_{i,L}^{BH} + u_{i,L}^{FL}) + \delta_{i,L} (T_{i,L}^{comf} - T_{i,L}^{u_{i,L}})^2, \quad (4.41)$$

Par conséquent, les objectifs individuels de chaque consommateur sont de minimiser la facture d'électricité ($\sum_{h=1}^H \pi(u_{i,L}^{BH} + u_{i,L}^{FL})$) et maximiser le confort ($\sum_{h=1}^H \delta_{i,L} (T_{i,L}^{comf} - T_{i,L}^{u_{i,L}})^2$). où $u_{i,L} = u_{i,L}^{BH} + u_{i,L}^{FL}$ exprime la consommation totale d'énergie du $i^{\text{ème}}$ ménage, $u_{i,L}^{BH}$ symbolise la consommation d'énergie de la plinthe chauffante électrique, $u_{i,L}^{FL}$ représente les charges fixes (non planifiables), $T_{i,L}^{comf}$ représente la température intérieure souhaitée (meilleur confort), $\delta_{i,L}$

caractérise les niveaux de confort dans toutes les tranches de temps. Les consommateurs sélectionnent les niveaux de confort dans l'ensemble des valeurs possibles de $\delta_{set} = \{\delta_{min}, \delta_{max}\}$. $\delta_{i,L} = \delta_{max}$ signifie que les résidents sont intéressés par le mode confort, et que la température intérieure doit se rapprocher du point de consigne de température souhaité. Le processus de sélection du mode de fonctionnement présenté maximise la flexibilité du consommateur tout en respectant les contraintes thermiques. En outre, la sélection du mode de fonctionnement permet de choisir le mode confort ($\delta_{i,L} = \delta_{max}$) ou le mode économique (δ_{min}) dans tous les créneaux horaires. Par conséquent, l'agent HEMS modifie le profil de consommation des plinthes chauffantes pour ajuster la température intérieure en respectant les contraintes suivantes,

$$T_{i,L}^{u_{i,L}} \in [T_{i,L}^{\min}, T_{i,L}^{\max}], \quad (4.42)$$

$$\delta_{set} = \{\delta_{min}, \delta_{max}\}, \quad (4.43)$$

$$u_{i,L}^{BH} \in [u_{i,L}^{BH,\min}, u_{i,L}^{BH,\max}], \quad (4.44)$$

$$u_{i,L} \in [u_{i,L}^{\min}, u_{i,L}^{\max}], \quad (4.45)$$

où $T_{i,L}^{\min}$ définit les températures intérieures minimales acceptables, $T_{i,L}^{\max}$ indique les températures intérieures maximales acceptables, $u_{i,L}^{BH,\min}$ représente la consommation d'énergie minimale du chauffage, et $u_{i,L}^{BH,\max}$ la consommation d'énergie maximale du chauffage. $u_{i,L}^{\min}$ et $u_{i,L}^{\max}$ symbolisent la consommation énergétique minimale et maximale acceptable du ménage, respectivement. Le niveau de flexibilité du consommateur (capacité à participer à un programme de réponse à la demande) est modélisé en configurant $\delta_{i,L}$ et $T_{i,L}^{\text{comf}}$ pendant la journée. F_L^{shr} fait référence à ,

$$F_L^{shr}(N_H \bar{Z}_L^k) = \left\| N_H \bar{Z}_L^k - \left(\sum_{h=0}^H \frac{N_H \bar{Z}_L^{k,h}}{H} \right) \right\|_2^2 + \left\| \sum_{h=0}^H N_H \bar{Z}_L^{k,h} \right\|_2^2, \quad (4.46)$$

où H indique l'horizon temporel. Ainsi, les objectifs communs de chaque coordinateur local sont d'aplanir le profil agrégé de son groupe résidentiel correspondant et de minimiser la

facture d'électricité agrégée.

4.2.5 Coordination de Niveau Supérieur

La coordination de niveau supérieur entre les coordinateurs locaux par la supervision du coordinateur du réseau peut être décrite par (4.47) - (4.49).

$$u_{j,G}^{k+1} := \arg \min_{u_{j,G}} \left(F_{j,G}^{ind}(u_{j,G}) + \frac{\rho_G}{2} \|u_{j,G} - u_{j,G}^k + \Delta_{j,G}^k\|_2^2 \right), \quad (4.47)$$

$$\bar{Z}_G^{k+1} := \arg \min_{\bar{Z}_G^k} \left(cr F_G^{shr}(N_{CR} \bar{Z}_G^k) + \frac{N_{CR} \rho_G}{2} \|\Psi_G^{k+1}\|_2^2 \right), \quad (4.48)$$

$$\lambda_G^{k+1} := \lambda_G^k + \bar{u}_G^{k+1} - \bar{Z}_G^{k+1}, \quad (4.49)$$

où N_{CR} détermine le nombre de coordinateurs locaux dans la société, $j \in \{1, \dots, N_{CR}\}$ représente chaque index de coordinateur local, ρ_G symbolise le taux de convergence dans la coordination de niveau supérieur, $u_{j,G}^k$ représente la décision du coordinateur local j à l'itération k dans la coordination de niveau supérieur, \bar{Z}_G^k définit la moyenne des variables globales dans la coordination de niveau supérieur, λ_G^k désigne les variables duales dans la coordination de niveau supérieur, $F_{j,G}^{ind}$ (représenté dans (4.51)) détermine les objectifs individuels du coordinateur local j , et F_G^{shr} (représenté dans (4.52)) spécifie les objectifs partagés de la société transmis par le coordinateur du réseau aux coordinateurs locaux. Ψ_G^{k+1} représente,

$$\Psi_G^{k+1} = \bar{Z}_G^k - \lambda_G^k - \bar{u}_G^{k+1} \quad (4.50)$$

Les objectifs individuels du coordinateur local j et les objectifs partagés de la société sont décrits par (4.51) et (4.52), respectivement.

$$F_{j,G}^{ind}(u_{j,G}) = \left\| u_{j,G}^k - \left(\sum_{h=0}^H \frac{u_{j,G}^{k,h}}{H} \right) \right\|_2^2 + \left\| \sum_{h=0}^H u_{j,G}^{k,h} \right\|_2^2, \quad (4.51)$$

$$F_G^{shr}(N_{CR}\bar{Z}_G^k) = \left\| N_{CR}\bar{Z}_G^k - \left(\sum_{h=0}^H \frac{N_{CR}\bar{Z}_G^{k,h}}{H} \right) \right\|_2^2 + \left\| \sum_{h=0}^H N_{CR}\bar{Z}_G^{k,h} \right\|_2^2, \quad (4.52)$$

Ainsi, chaque coordinateur local essaie d'aplanir son profil agrégé correspondant et de minimiser la facture agrégée dans le groupe résidentiel. De même, le coordinateur du réseau vise à améliorer le facteur de charge de la société et à réduire le coût agrégé de la société. Comme expliqué précédemment, les acteurs participant à la coordination hiérarchique des HEMS dans la société sont le coordinateur du réseau, les coordinateurs locaux et les SH de chaque groupe résidentiel. L'emplacement des acteurs, leurs objectifs et l'échange de données au cours de la procédure de coordination hiérarchique des HEMS proposée ont été mis en évidence dans la Fig. 4-2. Comme l'illustre la Fig. 4-2, il existe deux types de consensus dans la coordination : le consensus local dans chaque groupe résidentiel et le consensus général dans la société. Dans le premier cas, chaque coordinateur local met à jour l'accord local de son groupe à chaque itération. Cependant, dans le second cas, le coordinateur du réseau met à jour le consensus de la société sur la base des accords mis à jour dans les consensus locaux des groupes résidentiels. Par conséquent, le processus de coordination itératif et hiérarchique permettra d'atteindre un accord global dans la société. En effet, à chaque itération, les joueurs mettent à jour leurs décisions pour remplir leurs objectifs et échangent des données ou des décisions mises en évidence dans la Fig. 4-2. L'échange de ces données dans le cadre hiérarchique permet de construire une coordination hiérarchique dans la société et d'atteindre les objectifs individuels/partagés. La Figure 4-2 résume le processus de coordination hiérarchique proposé dans la société. La première étape du processus de coordination inclut l'initialisation, la définition du prix de l'électricité et la réception des prévisions météorologiques. L'initialisation spécifie les valeurs initiales des paramètres/variables utilisés dans les modèles et l'algorithme de coordination, et définit les états initiaux des acteurs (leurs décisions). Ensuite, chaque HEMS de chaque groupe résidentiel résout son problème d'optimisation pour atteindre les objectifs individuels, les objectifs partagés du groupe correspondant et les objectifs partagés de la société. Chaque HEMS transmet son profil mis à jour au coordinateur local affilié. Après avoir recueilli toutes les décisions des SH par le coordinateur local correspondant, chaque

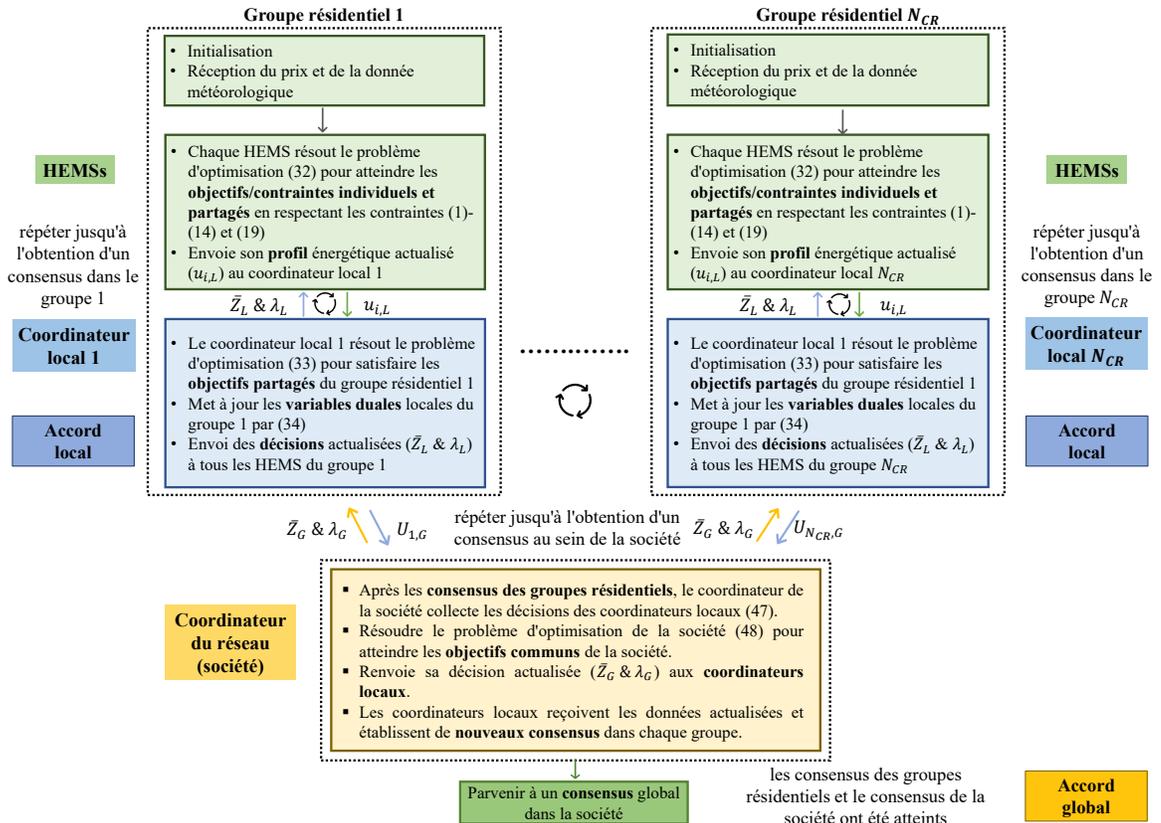


FIGURE 4-2 Topologie hiérarchique proposée pour la coordination des HEMS

coordinateur local résout son problème d'optimisation pour satisfaire les objectifs partagés du groupe et de la société. De plus, les coordinateurs locaux envoient les décisions mises à jour au coordinateur du réseau. Le coordinateur du réseau résout le problème d'optimisation de la société pour résoudre les défis spécifiques au niveau de la société. Ensuite, le coordinateur du réseau met à jour ses variables globales et duales et les transmet aux coordinateurs locaux. Les coordinateurs locaux mettent à jour leurs variables globales/duales et les transmettent à toutes les SH du groupe correspondant. Encore une fois, chaque HEMS essaie de résoudre son problème avec les variables globales/duales mises à jour. Toutes les procédures mentionnées constituent une itération de la procédure de coordination hiérarchique itérative. Le processus se poursuit jusqu'à ce que les coordinateurs locaux et du réseau parviennent à un consensus général au niveau de la société et que le problème d'optimisation converge vers la solution.

La procédure de l'algorithme de coordination hiérarchique des HEMS proposé, les accords locaux/globaux et les objectifs de chaque acteur sont résumés dans la Figure 4-3.

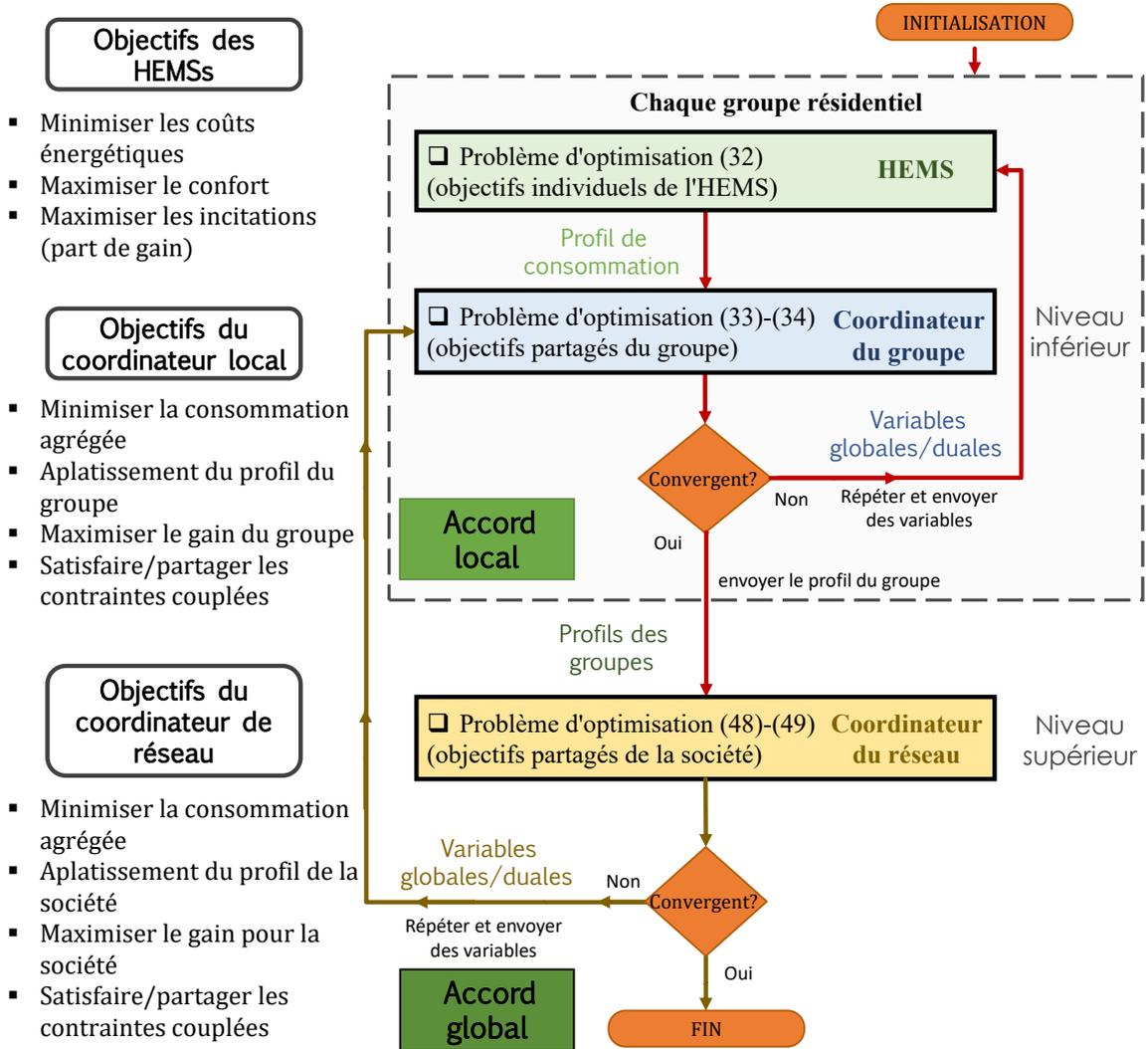


FIGURE 4-3 Procédure de coordination des HEMS hiérarchique proposée

4.3 Mécanisme de partage des contraintes couplées

Cette section présente un mécanisme de partage des contraintes couplées dans la société et les groupes résidentiels entre les consommateurs. Le mécanisme de partage des contraintes couplées conduit à la prise en compte des contraintes dans le processus de décision de chaque consommateur. Les contraintes couplées (4.17)-(4.18) sont réécrites par leur reformulation équivalente comme (4.53)-(4.54), respectivement.

$$\max \left\{ \sum_{j=1}^{N_{CR}} \sum_{i=1}^{N_H} u_{ji}^T(h), U_{max}^S \right\}^2, \quad (4.53)$$

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^{N_H} u_{ji}^T(h), U_{max}^{RG_j} \right\}^2, \quad (4.54)$$

Ensuite, nous employons la relaxation Lagrangienne [171] pour transférer les contraintes couplées comme objectifs partagés à travers la procédure de coordination hiérarchique proposée. Donc, chaque coordinateur local et chaque consommateur considèrent ces contraintes dans leur processus de prise de décision. Par conséquent, les objectifs partagés des coordinateurs locaux (4.46) et les objectifs partagés de la société (4.52) ont été développés comme (4.55) et (4.56), respectivement, pour considérer le partage des contraintes couplées entre les joueurs.

$$\begin{aligned} F_L^{shr}(N_H \bar{Z}_L^k) &= \left\| N_H \bar{Z}_L^k - \left(\sum_{h=0}^H \frac{N_H \bar{Z}_L^{k,h}}{H} \right) \right\|_2^2 \\ &+ \left\| \sum_{h=0}^H N_H \bar{Z}_L^{k,h} \right\|_2^2 + \Gamma_L^{const} \left\| \max \left\{ U_{max}^{RG_j}, N_H \bar{Z}_L^{k,h} \right\}^2 \right\|_2^2, \end{aligned} \quad (4.55)$$

$$\begin{aligned} F_G^{shr}(N_{CR} \bar{Z}_G^k) &= \left\| N_{CR} \bar{Z}_G^k - \left(\sum_{h=0}^H \frac{N_{CR} \bar{Z}_G^{k,h}}{H} \right) \right\|_2^2 \\ &+ \left\| \sum_{h=0}^H N_{CR} \bar{Z}_G^{k,h} \right\|_2^2 + \Gamma_G^{const} \left\| \max \left\{ U_{max}^S, N_{CR} \bar{Z}_G^{k,h} \right\}^2 \right\|_2^2, \end{aligned} \quad (4.56)$$

où Γ_L^{const} et Γ_G^{const} représentent la priorité des contraintes couplées partagées par rapport aux objectifs partagés. Dans ce travail, nous considérons $\Gamma_L^{const} = \Gamma_G^{const} = 50$ pour modéliser une priorité élevée pour les contraintes couplées. Les contraintes couplées partagées ont la priorité la plus élevée par rapport aux autres objectifs partagés en raison de Γ_L^{const} , Γ_G^{const} , et de l'opérateur maximum au carré ($\max\{\cdot, \cdot\}^2$).

4.4 Mécanisme de distribution de gain

La coordination hiérarchique des HEMS présentée comprend des jeux «gagnant-gagnant» entre les ménages de chaque groupe résidentiel et un jeu «gagnant-gagnant» entre les coordinateurs locaux de la société. Chaque accord dans les groupes résidentiels a son coordinateur local, et le jeu dans la société a son coordinateur du réseau pour établir un consensus dans chaque jeu. Les SH de chaque groupe collaborent pour atteindre des objectifs/contraintes

individuels et partagés, et les coordinateurs locaux de la société coopèrent pour atteindre des objectifs/contraintes individuels et partagés. Les SH et les coordinateurs locaux (groupes résidentiels) contribuent en fonction de leur flexibilité et ont donc différents niveaux de contribution à la coordination. Il est donc impératif de mesurer la contribution de chaque ménage et de chaque groupe afin de répartir le gain total de la société entre les groupes, puis d'attribuer la part de chaque maison à partir du gain du groupe correspondant. Ensuite, le gain total de la société peut être distribué entre les groupes et le gain de chaque groupe entre ses ménages.

Dans ce travail, deux mécanismes de partage des récompenses ont été conçus sur la base du concept des valeurs de Shapley [168] pour distribuer le gain d'abord entre les groupes et ensuite entre les maisons de chaque groupe. Le jeu de coalition de niveau supérieur (société) possède N_{CR} joueurs (coordinateurs locaux) et une fonction de valeur (caractéristique) v_G qui évalue la valeur de chaque coalition et fait correspondre les sous-ensembles des joueurs aux nombres réels. De même, chaque jeu de coalition de niveau inférieur (groupe) inclut N_H joueurs (consommateurs) et la fonction caractéristique v_L . Le montant que le joueur (coordinateur local) i reçoit dans le jeu de coalition donné (v_G, \mathbb{C}_G) a été calculé par (4.57). Le montant que le joueur (consommateur) i obtient dans le jeu de coalition donné (v_L, \mathbb{C}_L) est calculé par (4.58).

$$\varphi_i^G(v_G) = \sum_{C_G \subseteq \mathbb{C}_G \setminus \{i\}} \left(\frac{|C_G|!(N_{CR} - |C_G| - 1)!}{N_{CR}!} (v_G(C_G \cup \{i\}) - v_G(C_G)) \right), \quad (4.57)$$

$$\varphi_j^L(v_L) = \sum_{C_L \subseteq \mathbb{C}_L \setminus \{j\}} \left(\frac{|C_L|!(N_H - |C_L| - 1)!}{N_H!} (v_L(C_L \cup \{j\}) - v_L(C_L)) \right), \quad (4.58)$$

que la fonction $v_G : 2_{CR}^N \rightarrow R$ présente des fonctions caractéristiques dans le jeu de coalition au niveau supérieur, la fonction $v_L : 2_H^N \rightarrow R$ représente les fonctions caractéristiques dans les jeux de coalition de niveau inférieur, \mathbb{C}_G désigne l'ensemble des coalitions possibles de tous les joueurs au niveau supérieur, \mathbb{C}_L indique l'ensemble des coalitions possibles de

tous les joueurs dans chaque groupe résidentiel (jeux de niveau inférieur), C_G décrit les sous-ensembles de toutes les coalitions de joueurs établis dans le jeu de niveau supérieur, C_L symbolise les sous-ensembles de coalitions de joueurs établis dans le jeu de niveau inférieur, $|C_G|$ indique la cardinalité du sous-ensemble C_G , $|C_L|$ désigne la cardinalité du sous-ensemble C_L , $v_G(C_G)$ démontre la valeur de la coalition C_G , $v_L(C_L)$ représente la valeur de la coalition C_L , $C_G \subseteq \mathbb{C}_G \setminus \{i\}$ étend la somme sur tous les sous-ensembles de coalition du jeu de niveau supérieur C_G de \mathbb{C}_G ne contenant pas le joueur i , et $C_L \subseteq \mathbb{C}_L \setminus \{j\}$ étend la somme sur tous les sous-ensembles de coalition des jeux de niveau inférieur C_L de \mathbb{C}_L ne contenant pas le joueur j . La fonction $v_G(C_G)$ indique que dans la coalition donnée C_G du jeu de niveau supérieur, le gain total attendu est de $v_G(C_G)$ et la fonction $v_L(C_L)$ signifie que dans la coalition donnée C_L de jeux de niveau inférieur, le gain total attendu est de $v_L(C_L)$. Le processus de partage des gains dans le jeu de niveau supérieur est interprété comme suit. Tout d'abord, chaque joueur (coordinateur local) crée toutes les coalitions concevables avec les autres joueurs. Ensuite, la contribution marginale du joueur $v_G(C_G \cup \{i\}) - v_G(C_G)$ comme équilibre équitable est calculée. Enfin, la contribution moyenne de chaque joueur est calculée sur les permutations de la coalition possible. Le calcul de la contribution moyenne de chaque joueur peut être reformulé de manière équivalente en (4.59) et (4.60), respectivement, pour la distribution des gains au niveau supérieur (parts des coordinateurs locaux) et au niveau inférieur (parts des consommateurs).

$$\phi_i^G(v_G) = \frac{1}{N_{CR}} \sum_{C_G \subseteq \mathbb{C}_G \setminus \{i\}} \left(\binom{N_{CR} - 1}{|C_G|}^{-1} (v_G(C_G \cup \{i\}) - v_G(C_G)) \right) \quad (4.59)$$

$$\phi_j^L(v_L) = \frac{1}{N_H} \sum_{C_L \subseteq \mathbb{C}_L \setminus \{j\}} \left(\binom{N_H - 1}{|C_L|}^{-1} (v_L(C_L \cup \{j\}) - v_L(C_L)) \right) \quad (4.60)$$

où ϕ_i^G et ϕ_j^L symbolisent la part de chaque groupe et la part de chaque consommateur (dans chaque groupe) calculée en fonction de leur contribution marginale.

Le mécanisme de partage des gains est budgétairement équilibré, et la somme des parts de

tous les groupes est égale au gain total de la société, comme expliqué dans (4.61). En outre, la somme des parts de tous les consommateurs est égale au gain total de la société.

$$Gaintotal = \sum_{i=0}^{N_{CR}} \phi_i^G = \sum_{i=0}^{N_{CR}} \sum_{j=0}^{N_H} \phi_{ij}^L \quad (4.61)$$

Les fonctions caractéristiques v_G et v_L quantifient les valeurs des coalitions C_G et C_L par (4.62) et (4.63).

$$v_G(C_G) = \frac{\|U_G^{CR} - U_G^{NCR}\|_2^2}{\|U_{G,C_N}^{CR} - U_{G,C_N}^{NCR}\|_2^2}, \quad (4.62)$$

$$v_L(C_L) = \frac{\|U_L^{CR} - U_L^{NCR}\|_2^2}{\|U_{L,C_N}^{CR} - U_{L,C_N}^{NCR}\|_2^2}, \quad (4.63)$$

U_G^{CR} indique le profil agrégé d'une coalition de niveau supérieur après application de la coordination, U_G^{NCR} indique le profil agrégé d'une coalition de niveau supérieur avant coordination, U_{G,C_N}^{CR} représente le profil d'une grande coalition de niveau supérieur après coordination, et U_{G,C_N}^{NCR} exprime le profil d'une grande coalition de niveau supérieur avant coordination. U_L^{CR} présente le profil d'une coalition de niveau inférieur après coordination, U_L^{NCR} symbolise le profil d'une coalition de niveau inférieur avant coordination, U_{L,C_N}^{CR} définit le profil d'une grande coalition de niveau inférieur après coordination, et U_{L,C_N}^{NCR} désigne le profil d'une grande coalition de niveau inférieur avant coordination. La grande coalition dans le jeu de niveau supérieur réfère à la coalition qui inclut tous les groupes (coordinateurs locaux), et la grande coalition dans le jeu de niveau inférieur réfère à la coalition qui inclut tous les consommateurs dans le groupe donné. La valeur de la fonction caractéristique est dans l'intervalle de $0 \leq v \leq 1$ et la valeur de chaque grande coalition est égale à 1. Le mécanisme de partage des gains proposé possède des propriétés d'efficacité, de rationalité individuelle, de symétrie et de joueur nul.

Chapitre 5 - Étude de cas, simulation et évaluation des performances

Ce chapitre présente premièrement l'étude de cas du voisinage pour la coordination des consommateurs dans un groupe résidentiel et ensuite l'étude de cas de la société pour la coordination hiérarchique des consommateurs. Ensuite, les simulations pour chaque cas ont été présentées et les performances de la coordination proposée ont été évaluées. Enfin, la discussion pour chaque cas a été fournie.

5.1 Coordination à un seul niveau

5.1.1 Configuration de la validation et étude de cas

Cette section spécifie les paramètres et les données expérimentales utilisés pour construire les modèles et mettre en œuvre l'approche de coordination des HEMS à un seul niveau proposée dans un groupe résidentiel. En outre, une étude de cas est proposée. L'étude comprend un système de distribution d'énergie dans lequel le fournisseur dessert des groupes résidentiels; chaque groupe résidentiel comprend quinze maisons intelligentes (SH). Les ménages utilisent leurs plinthes électriques comme sources de flexibilité pour participer au programme de coordination. La puissance maximale des plinthes électriques de chaque SH est de 10 kW. Cette étude utilise des données expérimentales pour construire des modèles thermiques de maison et des profils de consommation stochastiques des consommateurs du groupe résidentiel. En fait, 15 maisons unifamiliales détachées situées à Trois-Rivières, Québec, Canada, ont été instrumentées. Les données réelles de ces ménages sont illustrées dans le Tableau 5-1. Les bâtiments sont équipées de plinthes chauffantes électriques et de thermostats avec contrôle de la température. Un système d'acquisition de données a été utilisé pour collecter les

données de températures intérieures et extérieures, la consommation électrique des plinthes chauffantes, et la consommation des autres charges de janvier à avril 2018. Les mesures sont effectuées à des intervalles d'échantillonnage de 10 minutes. Les données enregistrées sont employées pour construire un modèle thermique linéaire (4.2) piloté par les données de chaque bâtiment. Ce travail calcule les paramètres thermiques en utilisant les données expérimentales d'Hydro-Québec provenant des maisons du réseau de distribution du Québec. Les paramètres thermiques ont été calculés en utilisant les données de consommateurs au Québec et ont été simplifiés d'un modèle multizone pour obtenir un modèle uni-zone qui a été vérifié pour avoir le même comportement que le modèle complexe. Les paramètres thermiques $\Psi_i = [\Psi_i^A, \Psi_i^B, \Psi_i^C]$ pour chaque maison ont été calculés en utilisant la technique de régression ridge. Basé sur les données expérimentales, le groupe résidentiel comprend 15 SH avec la diversité suivante :

- surfaces (1568 à 4020 sqft);
- nombre d'occupants (1 à 6 personnes);
- nombre de thermostats (8 à 15);
- nombre d'étages (2, 1, et split);
- nombre de pièces (2 à 5);
- nombre de salles d'eau (2 à 4);
- nombre total de chambres (9 à 15).

En outre, certaines des maisons disposent d'un sous-sol, d'une piscine, d'un chauffe-piscine ou d'un spa. Le processus d'acquisition des données comprend également la préférence des clients pour l'ouverture/la fermeture de la porte pendant le jour et la nuit.

Ce travail utilise le prix le plus élevé du tarif fixe d'Hydro-Québec D [170] qui s'applique habituellement aux consommateurs domestiques et résidentiels. Il constitue le tarif d'électricité de base facturé à la majorité des clients résidentiels ainsi qu'aux exploitations agricoles. Il comprend une tarification fixe à deux niveaux :

- **premier niveau** : 6.159 ¢/kWh pour l'énergie totale consommée jusqu'à 40 kWh par jour multipliée par le nombre de jours de la période de consommation.
- **deuxième niveau** : 10 ¢/kWh pour le reste de l'énergie consommée.

Dans ce travail, le tarif de l'électricité est modélisé par le deuxième palier du tarif D comme $\pi = 10 \text{ ¢/kWh}$. Ici, π représente le tarif d'électricité, qui est indépendant du temps au Québec.

Le tarif fixe de 10 ¢/kWh est utilisé pour calculer les factures des clients dans l'étude de cas.

La consommation électrique des appareils du groupe résidentiel, à l'exception des plinthes électriques, a été enregistrée pendant trois mois. Les données sont utilisées pour construire un modèle semi-synthétique basé sur des données afin de simuler de nombreux profils de charge non flexibles (quotidiens et hebdomadaires). Cette procédure vise à modéliser un profil de charge agrégé stochastique d'appareils non flexibles. L'agrégation des charges flexibles (EBH) et non flexibles (autres appareils) de tous les ménages du groupe résidentiel crée le profil de consommation agrégé. Dans ce travail, un modèle de DR à temps discret et à un jour d'avance avec un horizon fini a été présenté. L'horizon de planification du jour précédent est divisé en $H = 144$ intervalles égaux de 10 min. Les données statistiques des maisons équipées de thermostats programmables situées à Trois-Rivières, au Québec, provenant des travaux précédents de l'équipe de recherche [167], ont été utilisées pour modéliser les préférences de confort des utilisateurs. La température confortable des consommateurs T_i^{comf} a été choisie en utilisant les données expérimentales et la distribution discrète correspondante dans [167]. Les thermostats des maisons sont programmés de manière stochastique en fonction de la température confortable extraite de la distribution. L'ensemble des valeurs possibles pour la température confortable T_i^{comf} extraites par discrétisation de la distribution empirique est $[20, 21, 22, 23]$ en degrés Celsius avec les probabilités associées $P(T_i^{\text{comf}}) = [0.1, 0.3, 0.5, 0.1]$. Les valeurs sont utilisées dans l'optimisation de chaque maison pour maximiser la fonction d'utilité correspondante. Les températures intérieures minimales autorisées T_i^{min} ont été sélectionnées par la distribution discrète des thermostats sur les valeurs de réduction récurrentes. Les valeurs des températures intérieures minimales autorisées sont calculées par $T_i^{\text{min}} = T_i^{\text{comf}} - T_i^{\text{sp}}$. La T_i^{sp} est une variable random discrète qui prend des valeurs dans l'ensemble $\{1, 2, 3, 4\}$ de C^0 avec les probabilités $P(T_i^{\text{sp}}) = [0.1, 0.3, 0.4, 0.2]$. Ensuite, le paramètre δ_{max} est extrait d'une distribution log-normale avec une variance $\text{Var}(\delta_{\text{max}}) = 1$ et une espérance $\mathbb{E}(\delta_{\text{max}}) = 5$. Les préférences en matière de points de consigne pour 15 maisons basées sur l'expérience mentionnée sont illustrées sur la Figure. 5-1.

Dans l'étude de cas, une journée froide de l'hiver au Québec a été choisie pour vérifier l'approche proposée dans les pires circonstances, avec la température extérieure la plus froide enregistrée. Comme le montre la Figure 5-2, dans le cas sans réponse à la demande, deux pics

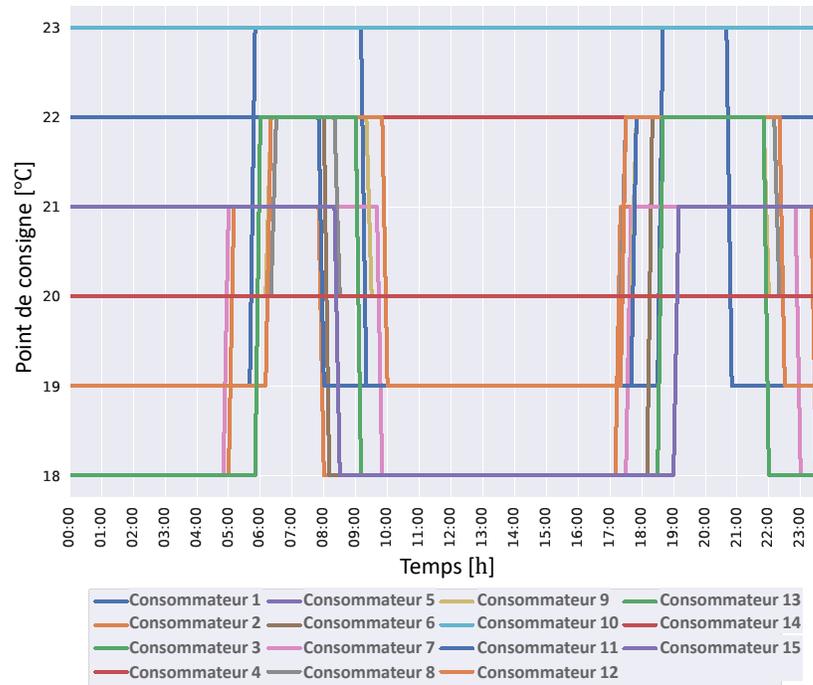


FIGURE 5-1 Points de consigne préférés des consommateurs pour les plinthes électriques.

de demande importants se sont produits le matin et l'après-midi lors d'une journée froide. La réponse à la demande coordonnée proposée vise à atténuer les pics, à réduire la facture globale et à satisfaire les objectifs individuels des utilisateurs.

5.1.2 Évaluation des performances

Cette section résume les analyses numériques et les simulations visant à évaluer les performances des HEMS coordonnés proposés à l'aide de l'algorithme proposé. La validation vise à examiner l'efficacité des HEMS coordonnés proposés en ce qui regarde la flexibilité des consommateurs. La flexibilité et la contribution des clients sont analysées en quantifiant la capacité à modifier le modèle de consommation régulier en réponse aux variables globales partagées par le coordinateur. Le mécanisme de partage des gains proposé pour distribuer le gain total entre les consommateurs sur la base de leur contribution est également évalué. En outre, l'impact du mécanisme DR coordonné proposé sur l'aplatissement du profil de consommation agrégé et la réduction des factures d'électricité a été étudié. La capacité de l'approche de coordination proposée à aplanir le profil agrégé a été examinée à différents

TABLEAU 5-1 Données réelles mettant en évidence les caractéristiques des maisons dans l'étude de cas.

Location	Nombre des Occupants		Surface (sq. ft.)		Portes		Sous-sol		Nombre des			Piscine	Chauffage de piscine	Spa
	thermostats	thermostats	étages	(jour)	(nuit)	chambres	toilettes	de chambres	chambres	toilettes	de chambres			
Trois-Rivières	12	4	2060	1	Ouvrir	Ouvrir	Non	3	2	12	Oui	Oui	Non	
Trois-Rivières	12	5	2636	1	Ouvrir	Fermer	Non	4	2	11	Oui	Non	Oui	
Trois-Rivières	8	3	1626	1	Ouvrir	Ouvrir	Non	3	2	9	Non	Non	Oui	
Trois-Rivières	12	4	2353	2	Ouvrir	Ouvrir	Oui	3	2	13	Oui	Oui	Non	
Trois-Rivières	13	6	4020	2	Fermer	Fermer	Oui	4	4	15	Oui	Oui	Non	
Trois-rivieres	9	2	1638	Split	Ouvrir	Ouvrir	Oui	2	2	10	Non	Non	Oui	
Trois-Rivières	12	2	2429	2	Fermer	Fermer	Oui	3	3	11	Non	Non	Non	
Trois-Rivières	15	4	3945	2	Ouvrir	Ouvrir	Oui	5	3	15	Non	Non	Non	
Trois-Rivières	11	3	1973	Split	Ouvrir	Ouvrir	Non	4	3	10	Non	Non	Oui	
Trois-Rivières	10	5	1944	1	Ouvrir	Fermer	Oui	4	2	11	Non	Non	Non	
Trois-Rivières	9	4	1568	1	Ouvrir	Fermer	Non	4	2	9	Non	Non	Non	
Trois-Rivières	10	4	2785	1	Ouvrir	Ouvrir	Non	3	2	10	Non	Non	Non	
Trois-Rivières	9	6	1800	Split	Ouvrir	Ouvrir	Non	4	2	10	Oui	Oui	Non	
Trois-Rivières	8	1	1752	Split	Ouvrir	Ouvrir	Non	3	2	10	Non	Non	Oui	
Trois-Rivières	15	4	2540	2	Ouvrir	Ouvrir	Oui	5	3	14	Oui	Non	Non	

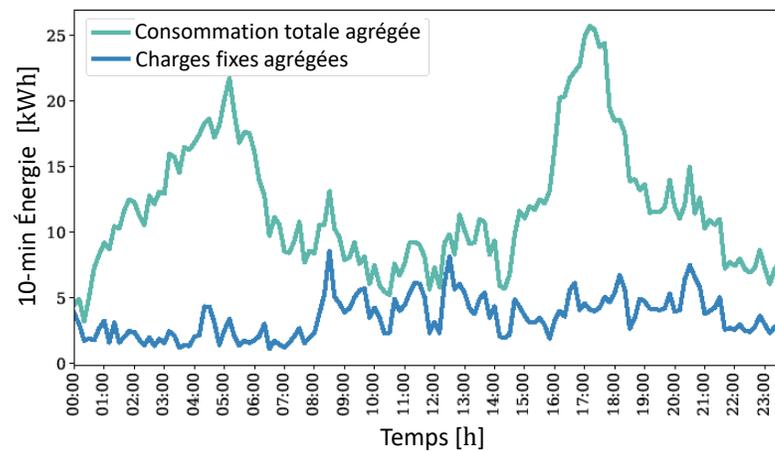


FIGURE 5-2 Consommation totale agrégée et charges fixes dans le groupe résidentiel sans appliquer la réponse à la demande.

niveaux de coordination entre les acteurs. La Figure 5-3 montre les profils agrégés après application du DR pour différents niveaux de coordination et les compare au cas sans DR. Basé sur les résultats, plus les niveaux de coordination sont élevés, plus le profil agrégé est aplati. En fait, un niveau de coordination plus élevé donne plus de valeur aux objectifs partagés dans le problème d'optimisation du coordinateur. Notez que $CR = 0$ correspond au cas non coordonné où les ménages optimisent uniquement leurs objectifs individuels. Au contraire, $CR = 1$ exprime le cas avec le plus haut niveau de coordination où les consommateurs prennent leurs décisions en réponse au coordinateur afin d'optimiser à la fois les objectifs individuels et les objectifs partagés.

L'effet des niveaux de coordination sur les revenus du gestionnaire du réseau de distribution (DSO) et le facteur de charge (LF) du profil de consommation agrégé est mis en évidence sur la Figure 5-4. Basé sur les résultats, le niveau de coordination le plus bas ($CR = 0$) conduit au revenu maximum du DSO, à la valeur minimum du LF du profil agrégé, et par conséquent au gain total minimum. Au contraire, le revenu minimum du DSO, la valeur maximum du LF du profil agrégé et le gain total maximum ont été atteints au niveau de coordination le plus élevé ($CR = 1$). La Figure 5-4 montre que le niveau de coordination $CR = 0,4$ améliore le LF du profil agrégé de 0,45 à 0,85. Le programme de DR avec des niveaux de coordination supérieurs à 0,4 n'améliore pas trop le LF et le gain total. Basé sur les résultats, il est évident que le coordinateur peut conduire l'équipe à satisfaire les objectifs partagés et les objectifs

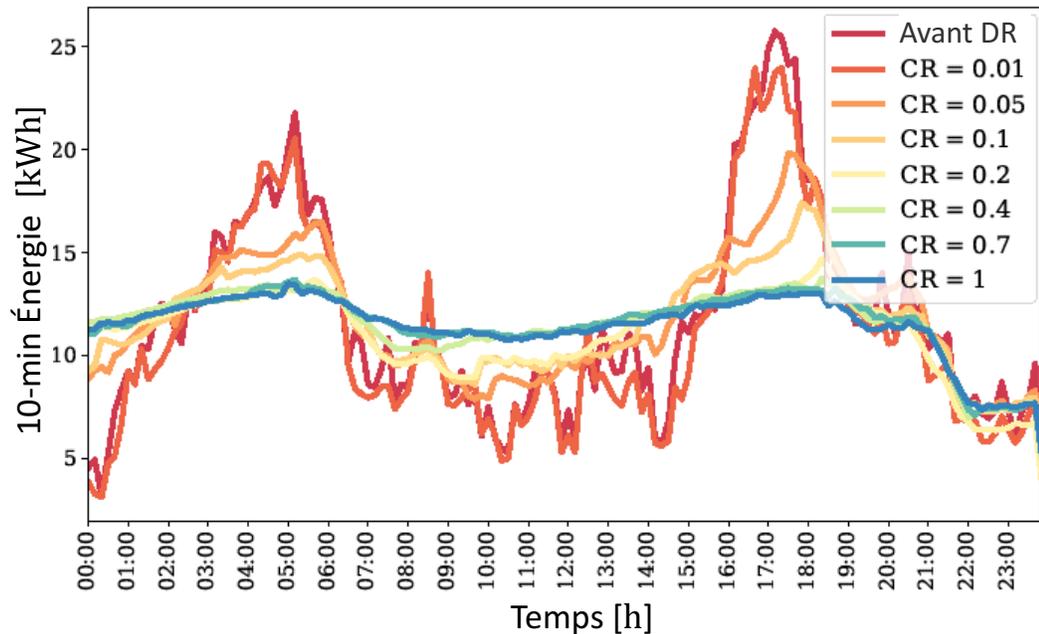


FIGURE 5-3 Consommation agrégée du groupe résidentiel après application de la réponse à la demande coordonnée proposée à différents niveaux de coordination.

individuels. En effet, les niveaux de coordination les plus élevés augmentent le gain en améliorant le FL et en diminuant le coût total.

La Figure 5-5 illustre la relation entre le LF et le taux de récompense avec les niveaux de coordination. Basé sur les résultats, l'augmentation du niveau de coordination de $CR = 0$ à $CR = 1$ conduit à une amélioration de la LF du profil agrégé et, par conséquent, à une augmentation du taux de récompense totale.

La Figure 5-6 présente les profils de consommation des maisons avant et après l'application de l'approche de coordination proposée. Elle met en évidence les efforts déployés par chaque SH (acteur) pour réviser son profil de consommation dans le cadre du processus de coordination. Les résultats montrent clairement que les consommateurs ont des niveaux de flexibilité différents. Par exemple, les foyers 14 et 15 ont le niveau de flexibilité le plus bas parce qu'ils sont en mode confort toute la journée pour maintenir la température intérieure proche du point de consigne et n'ont aucune flexibilité. Le foyer 2 a le niveau de flexibilité le plus élevé. Le gain total dans le groupe résidentiel sera partagé entre les acteurs en se basant sur leurs niveaux de contribution (modifications de profil) dans la coordination.

Un ensemble de simulations a été conçu pour prouver la robustesse de l'approche de

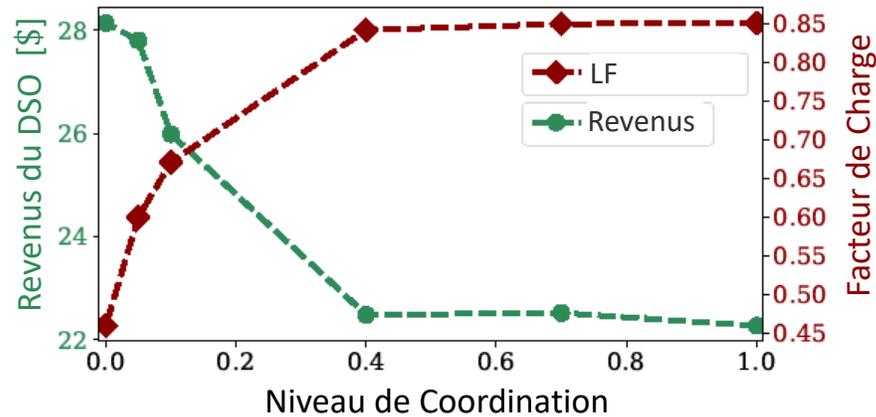


FIGURE 5-4 Recettes du DSO et facteur de charge profilé agrégé à différents niveaux de coordination.

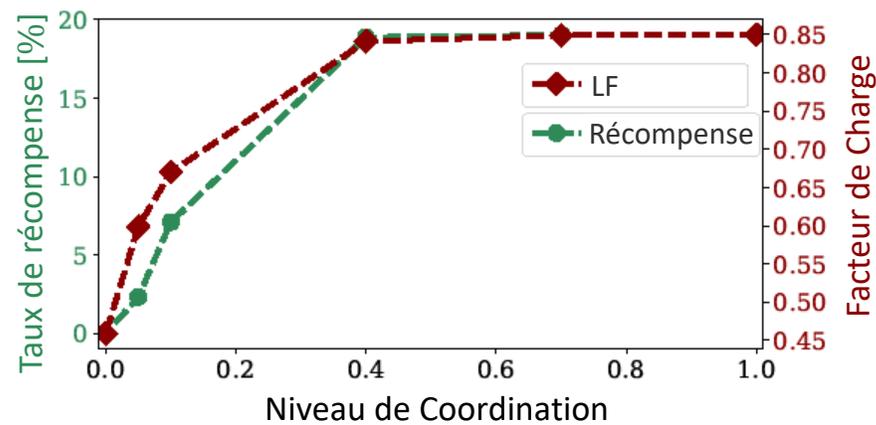


FIGURE 5-5 Taux de récompense total et facteur de charge du profil agrégé à différents niveaux de coordination.

coordination présentée par rapport aux préférences des utilisateurs. Dans cet ensemble, 180 études de cas ont été conçues. Les préférences des consommateurs, y compris les points de consigne et les niveaux de confort de l'EBH, ont été générées 30 fois de manière aléatoire par la distribution donnée dans la section 5.1.1 pour 6 différents niveaux de coordination pour créer les études de cas et exécuter le modèle 180 fois. La Figure 5-7 illustre le profil de consommation agrégé du groupe résidentiel après application de la DR pour 30 études de cas avec différentes préférences des consommateurs pour chaque niveau de coordination défini. Les niveaux de coordination ont été choisis parmi $\mathbb{CR} = [1, 0.7, 0.4, 0.1, 0.05, 0]$. Dans les simulations, l'approche a fonctionné pour l'ensemble des 180 études de cas différentes, et pas

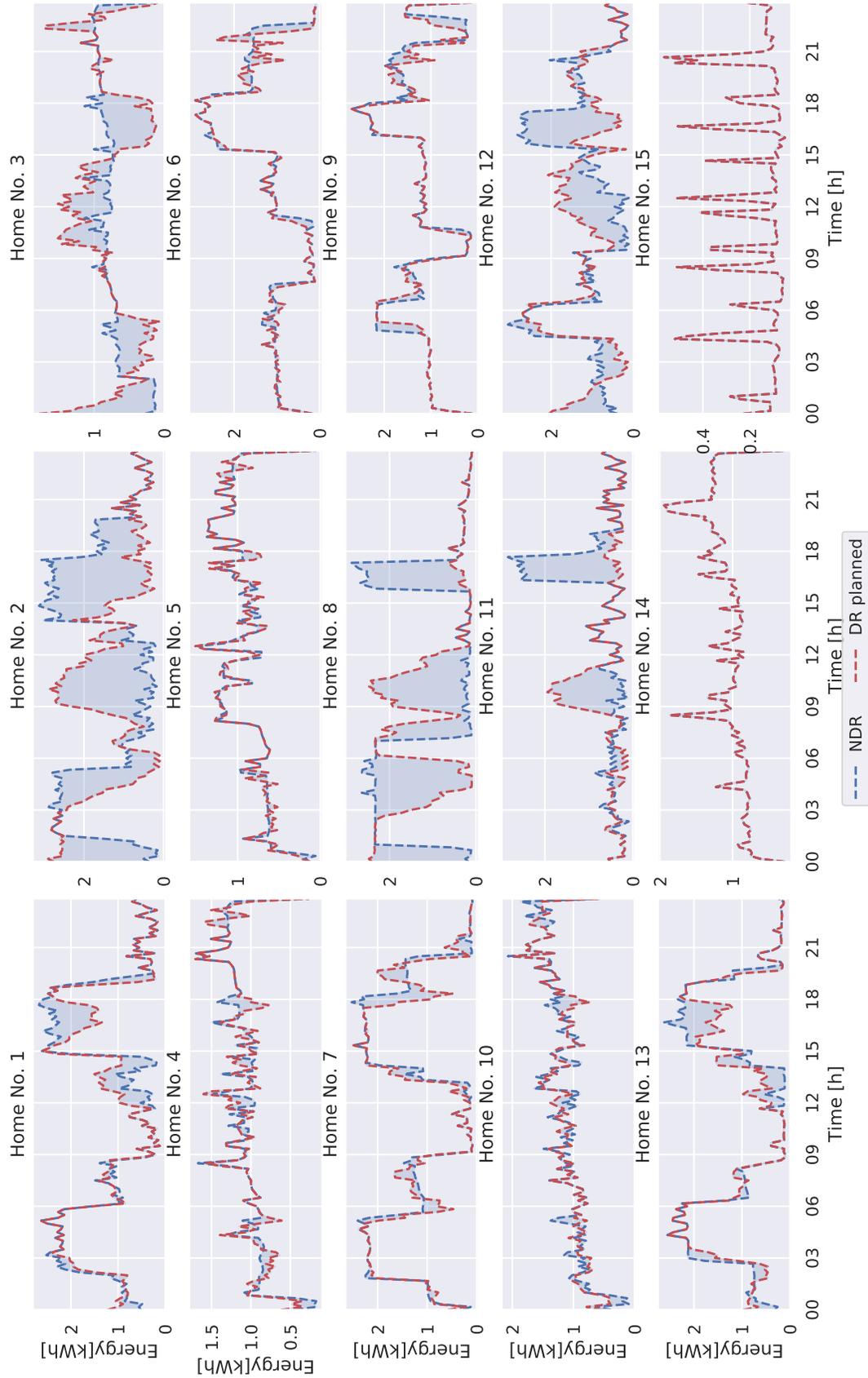


FIGURE 5-6 Profil de consommation des consommateurs après et avant le DR pour CR = 1.

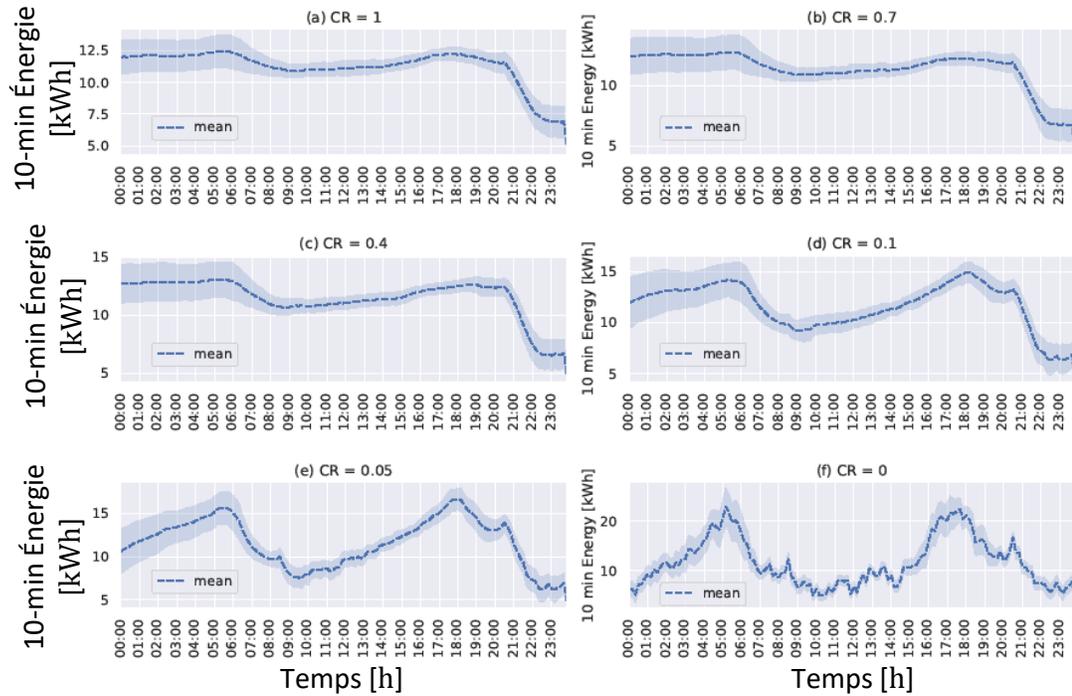


FIGURE 5-7 Profil de consommation agrégé après DR pour 30 études de cas avec des préférences de consommateurs différentes : (a) CR = 1, (b) CR = 0.7, (c) CR = 0.4, (c) CR = 0.1, (c) CR = 0.05, (c) CR = 0.

seulement pour une étude de cas spécifique. Ainsi, les résultats prouvent que le programme DR coordonné proposé est robuste face aux fluctuations des préférences des utilisateurs.

En outre, le programme DR coordonné proposé est étudié pour prouver sa robustesse face à l'incertitude de la température extérieure. Les écarts types réalistes (std) des erreurs entre les valeurs prédites et les températures extérieures réelles à chaque moment sont exploités pour modéliser l'incertitude. Les écarts types des erreurs de prévision et l'incertitude de la température extérieure sont illustrés à la Figure 5-8. L'écart type de l'erreur de prévision est plus élevé aux horizons plus longs, ce qui met en évidence le niveau plus élevé des incertitudes. Le profil de consommation agrégé après DR pour 30 études de cas avec l'incertitude de la température extérieure pour $CR = 1$ est présenté dans la Figure 5-9.

Dans les Figures 5-7 to 5-9, les bandes supérieures et inférieures sont représentées à un écart-type (positif et négatif) d'une moyenne simple. Ces figures comprennent trois lignes : une bande supérieure, une bande inférieure et une bande médiane (moyenne). La bande supérieure et la bande inférieure représentent 68,2 % de la population (résultats des études de

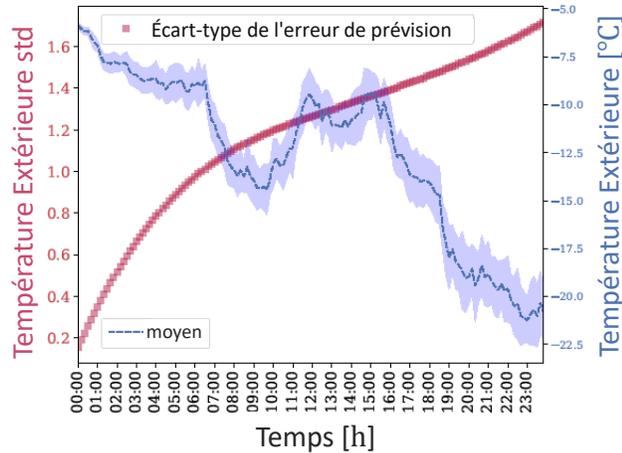


FIGURE 5-8 Les écarts types réalistes de l'erreur de prévision de la température extérieure et de l'incertitude de la température extérieure à chaque étape du temps.

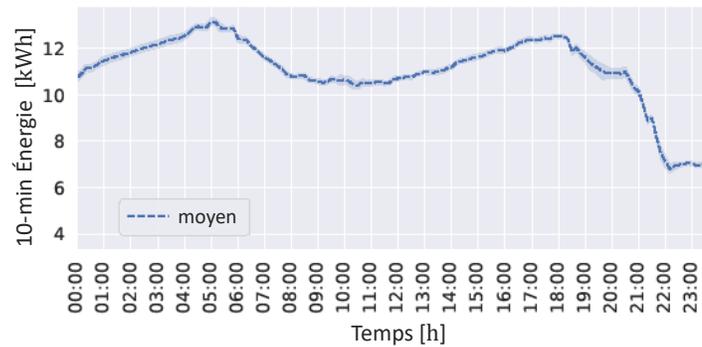


FIGURE 5-9 Profil de consommation agrégé après DR pour 30 études de cas avec incertitude sur la température extérieure [CR = 1].

cas). Comme nous l'avons expliqué dans la section consacrée au mécanisme de partage des récompenses, les joueurs ont des niveaux de contribution différents à la coordination. Il est donc essentiel de mesurer la contribution de chaque joueur pour distribuer de manière juste le gain total entre les joueurs. La Figure 5-6 met en évidence les contributions des joueurs.

En outre, la Figure 5-10 présente les parts calculées des joueurs par le biais du mécanisme de partage des récompenses proposé.

Basé sur les résultats de la simulation, le gain total (3.16) dans l'étude de cas donnée est de 5.24\$. Le mécanisme de partage des récompenses (3.18) distribue le gain total entre les consommateurs en se basant sur leurs efforts de révision de leur profil de consommation. Les clients qui modifient leur profil en réponse au coordinateur plus que les autres reçoivent une part plus significative. Les maisons 14 et 15 ne sont pas flexibles et, par conséquent, ne sont

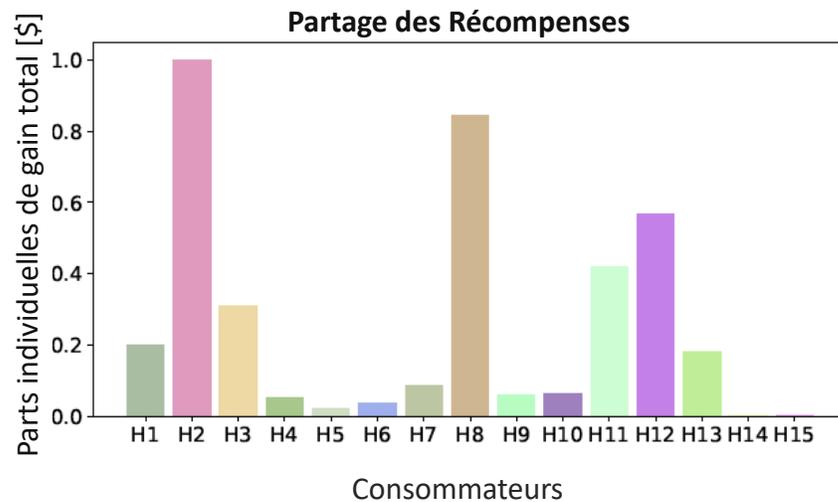


FIGURE 5-10 Parts des consommateurs dans le gain total pour CR = 1.

pas intéressées à contribuer à la coordination. Ainsi, les clients 14 et 15 ne reçoivent aucune part puisqu'ils ne font aucun effort pour réviser leur profil en réponse au coordinateur. Les consommateurs No. 2, No. 8, No. 11 et No. 12 ont des niveaux de contribution plus élevés que les autres et reçoivent plus de parts en conséquence. Les mécanismes de facturation et de partage des gains sont équitables ; par exemple, les joueurs qui n'ont pas contribué à la coordination ne reçoivent aucune part. En même temps, ils ne reçoivent pas de pénalité et paient leur facture d'électricité au tarif habituel. Au contraire, les joueurs qui contribuent à la coordination reçoivent une part du gain total et réduisent leur facture d'électricité. La part de chaque joueur est basée sur sa contribution marginale relative à la création de la grande coalition. L'ajout d'un joueur actif tel que le client 2 à la coalition augmente le gain ; cependant, l'ajout d'un joueur nul tel que le consommateur 15 n'affecte pas le gain. Par conséquent, les joueurs actifs ont des contributions marginales plus élevées et reçoivent des parts plus importantes. Basé sur le résultat, l'agrégation des parts de tous les joueurs est égale au gain total, et l'approche prévue a distribué tout le gain parmi les joueurs.

5.2 Coordination hiérarchique

5.2.1 Simulation et évaluation des performances

Cette section examine les performances de l'approche de coordination hiérarchique proposée et résume le calcul numérique et la simulation. La simulation vise à analyser l'efficacité et les performances de l'approche de coordination présentée en fonction de la flexibilité des ménages, de la taille de la société et du niveau de coordination. La simulation mesure les efforts des SH et des groupes résidentiels dans la révision de leur profil et teste la technique de distribution du gain total proposée. En outre, la coordination hiérarchique présentée a été comparée aux approches bien connues. Dans la simulation, nous avons utilisé deux sociétés différentes comme études de cas. La première inclut une société qui possède 5 groupes résidentiels (coordinateurs locaux) et 64 SH. La seconde étude de cas consiste en une société qui possède 2 groupes résidentiels (coordinateurs locaux) et 25 SH. Dans la première étude de cas, la société a été formée en connectant 5 groupes résidentiels qui possèdent 15, 14, 13, 12, et 10 SH. La société de la seconde étude de cas a été construite en combinant 2 groupes résidentiels avec 15 et 10 SH. Les ménages utilisent leurs plinthes électriques comme des actifs flexibles et planifiables pour participer au programme de coordination hiérarchique. On suppose que toutes les maisons ont été équipées de plinthes électriques d'une puissance de 10 kW. Les profils de consommation stochastiques des ménages et les modèles thermiques des bâtiments ont été construits à l'aide de données expérimentales [165], [167]. Les Figures 5-11 et 5-12 illustrent les profils de base des groupes résidentiels dans les sociétés qui comprennent 5 et 2 groupes, respectivement. Le profil de base représente le cas avant l'application du programme de réponse à la demande (coordination). Basé sur les profils de base, le profil agrégé de chaque groupe résidentiel comprend deux pics majeurs le matin et le soir. Les études de cas ont été réalisées pour une journée froide en hiver. La coordination hiérarchique des HEMS proposée vise à atteindre les objectifs des utilisateurs, à réduire les pics du profil agrégé de la société et à diminuer le coût total de l'énergie dans chaque groupe résidentiel et dans la société.

Comme expliqué dans la section 4.3, dans ce travail, un mécanisme a été présenté pour distribuer les contraintes couplées de la société et des groupes résidentiels parmi les consommateurs. Dans cette simulation, les limites de capacité énergétique maximale des transformateurs

au niveau de la société et du groupe sont considérées comme les contraintes couplées de la société et de chaque groupe. Un scénario de simulation a été conçu pour mettre en évidence le lien entre le niveau supérieur et inférieur dans le cadre hiérarchique proposé et pour tester la performance de la coordination hiérarchique présentée dans la satisfaction des contraintes couplées. Le mécanisme de partage des contraintes couplées relie le processus décisionnel des ménages et des coordinateurs locaux aux contraintes couplées au niveau de la société et des groupes. Dans ce scénario, on suppose qu'il n'y a pas d'autres objectifs partagés aux niveaux supérieur et inférieur (coût agrégé) et que seules les contraintes couplées partagées sont prises en compte. Ces hypothèses permettent de mettre en évidence la satisfaction des contraintes à différents niveaux du cadre hiérarchique.

Le mécanisme de partage des contraintes couplées proposé a été testé dans le cadre de cette étude. Ce mécanisme répartit les contraintes couplées de la société entre les coordinateurs des groupes résidentiels et distribue ensuite les contraintes couplées des groupes résidentiels entre les HEMS correspondants. Le mécanisme satisfait les contraintes de la société et des groupes (capacités énergétiques maximales). Les profils agrégés de la société et des groupes avant et

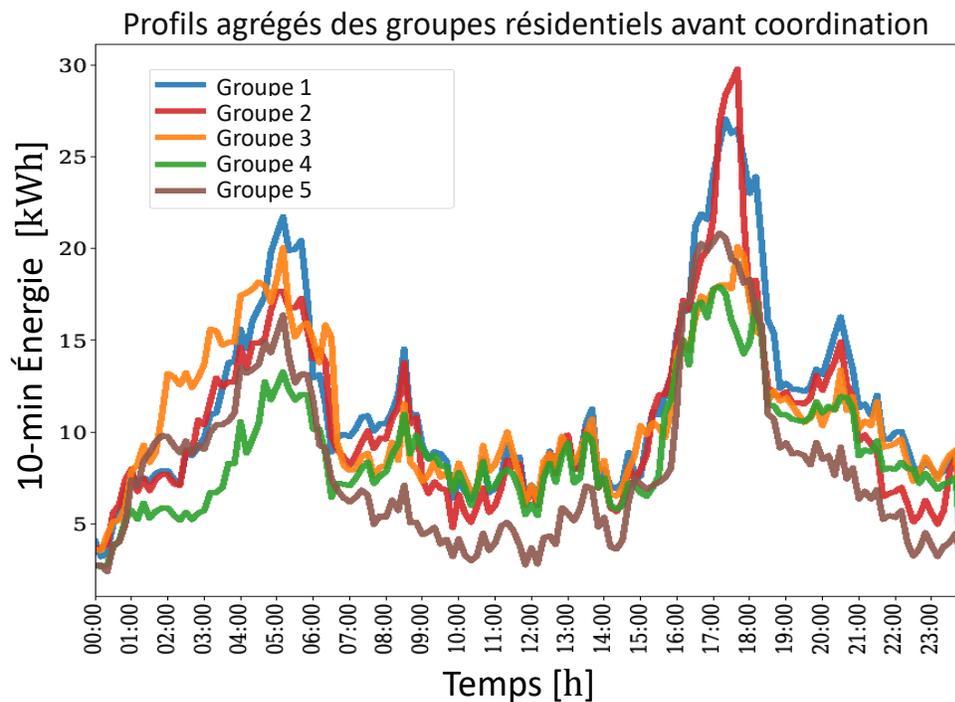


FIGURE 5-11 Les profils de base des groupes résidentiels dans la société (Société à cinq groupes)

après l'application (le partage) des contraintes couplées de la capacité énergétique maximale dans les transformateurs de la société et des groupes résidentiels, sans tenir compte d'autres objectifs partagés (minimisation des coûts agrégés et amélioration du facteur de charge), sont présentées dans les Figures 5-13 à 5-16. Les Figures comprennent les études de cas avec différents niveaux de limite de capacité maximale des transformateurs de la société et des groupes.

Les résultats des Figures 5-13 à 5-16 soulignent que la coordination respecte les contraintes de la société et des groupes en ce qui concerne leurs transformateurs correspondants. Dans le cas de la coordination avec la limite du groupe de 25 kWh et la limite de la société de 50 kWh dans la Figure 5-13, les profils des coordinateurs et des consommateurs restent presque constants. Les profils ne changent pas de manière significative parce qu'ils sont déjà inférieurs aux limites supérieures des transformateurs. Il n'est donc pas nécessaire de demander aux acteurs de modifier leurs profils. Dans le cas de coordination avec la limite du group de 20 kWh et la limite de la société de 40 kWh dans la Figure 5-14, chaque groupe modifie son profil pour

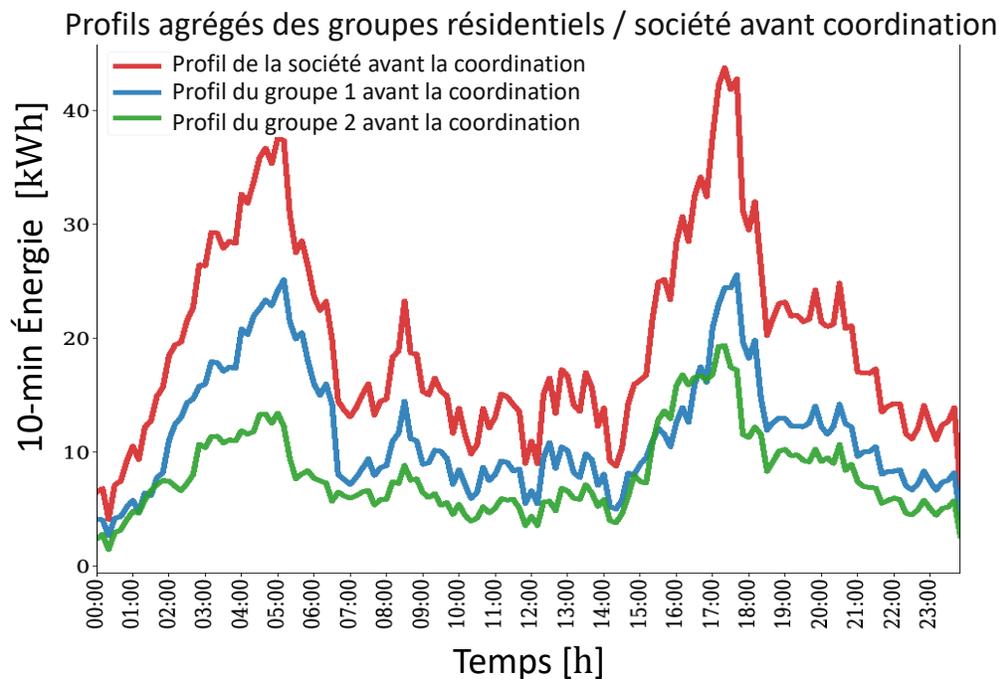


FIGURE 5-12 Les profils de base des groupes résidentiels dans la société (Société à deux groupes)

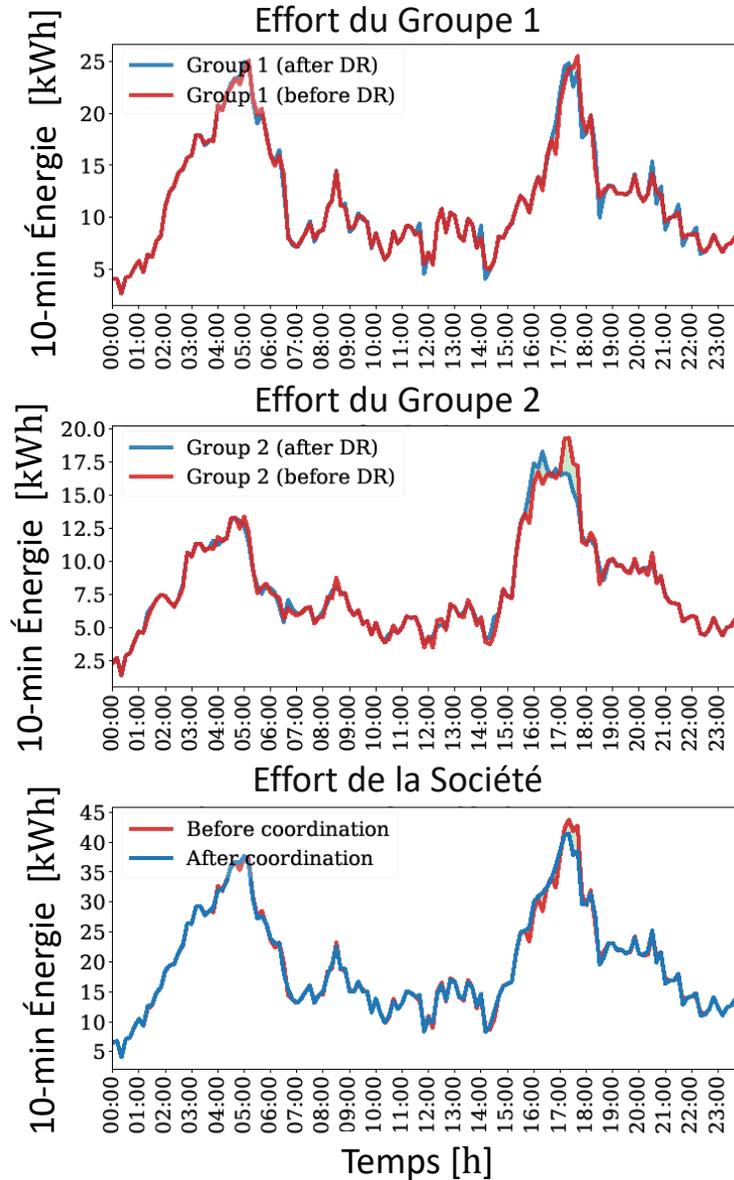


FIGURE 5-13 Les profils agrégés de la société et des groupes avant et après l'application des contraintes couplées de capacité énergétique maximale dans les transformateurs de la société et des groupes résidentiels. La limite : [Groupes :25 kWh, Société :50 kWh]

respecter les nouvelles limites des transformateurs. La Figure 5-15 montre le profil agrégé de la société et des groupes après la coordination pour respecter les limites des transformateurs. Dans ce cas, les limites pour les groupes et la société sont respectivement 18 kWh et 36 kWh. Dans le cas de coordination avec une limite de groupe de 15 kWh et une limite de société de 30 kWh dans la Figure 5-16, les modifications de profil dans les groupes résidentiels et les niveaux de société sont plus significatives. Ce cas comprend des contraintes couplées plus

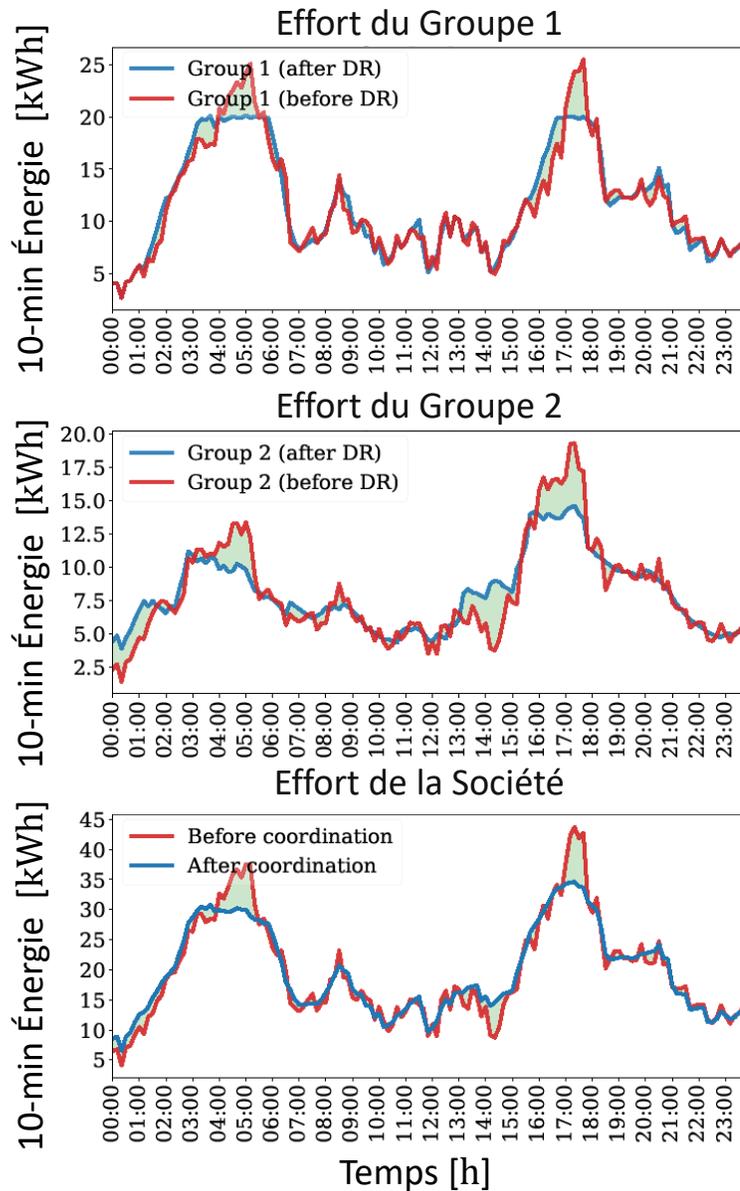


FIGURE 5-14 Les profils agrégés de la société et des groupes avant et après l'application des contraintes couplées de capacité énergétique maximale dans les transformateurs de la société et des groupes résidentiels. La limite : [Groupes :20 kWh, Société :40 kWh]

strictes et oblige donc les acteurs à un changement plus marqué que dans les autres cas. La satisfaction des contraintes couplées dépend du potentiel de flexibilité existant dans la société. Si les contraintes partagées sont trop strictes, les consommateurs ne peuvent les satisfaire qu'en modifiant les profils dans la proportion où la flexibilité le permet. Par exemple, dans l'étude de cas, les contraintes couplées les plus strictes pour le groupe 1 sont de 12,5 kWh, pour le groupe 2 de 9 kWh et pour la société de 21,5 kWh.

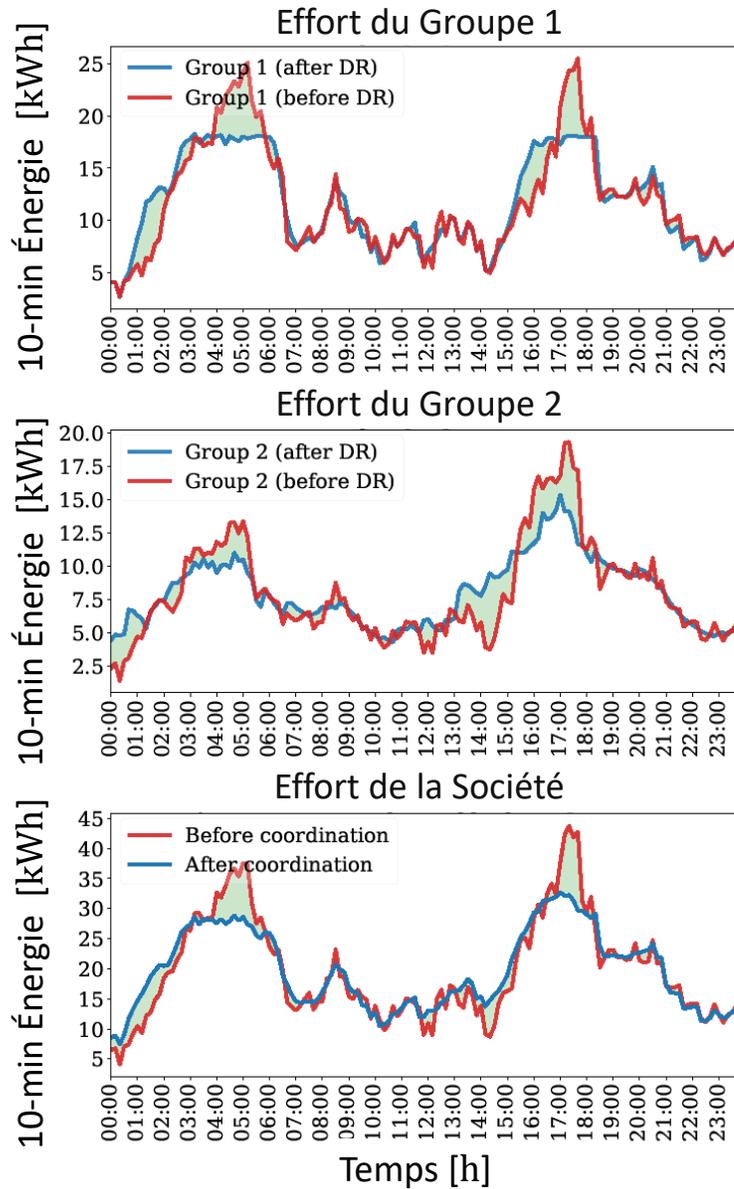


FIGURE 5-15 Les profils agrégés de la société et des groupes avant et après l'application des contraintes couplées de capacité énergétique maximale dans les transformateurs de la société et des groupes résidentiels. La limite : [Groupes :18 kWh, Société :36 kWh]

La Figure 5-17 (a) montre le profil agrégé de la société avant et après l'application de l'approche de coordination hiérarchique proposée pour le niveau maximal de coordination ($CR = 1$). Dans cette étude de cas, la société comprend cinq groupes résidentiels. La Figure met en évidence le prix de l'électricité et l'effort de la société pour réviser son profil agrégé. L'approche de coordination proposée réduit le coût agrégé du scénario de base de 120,47\$ à 117,88\$. En outre, la coordination hiérarchique des HEMS améliore le facteur de charge du

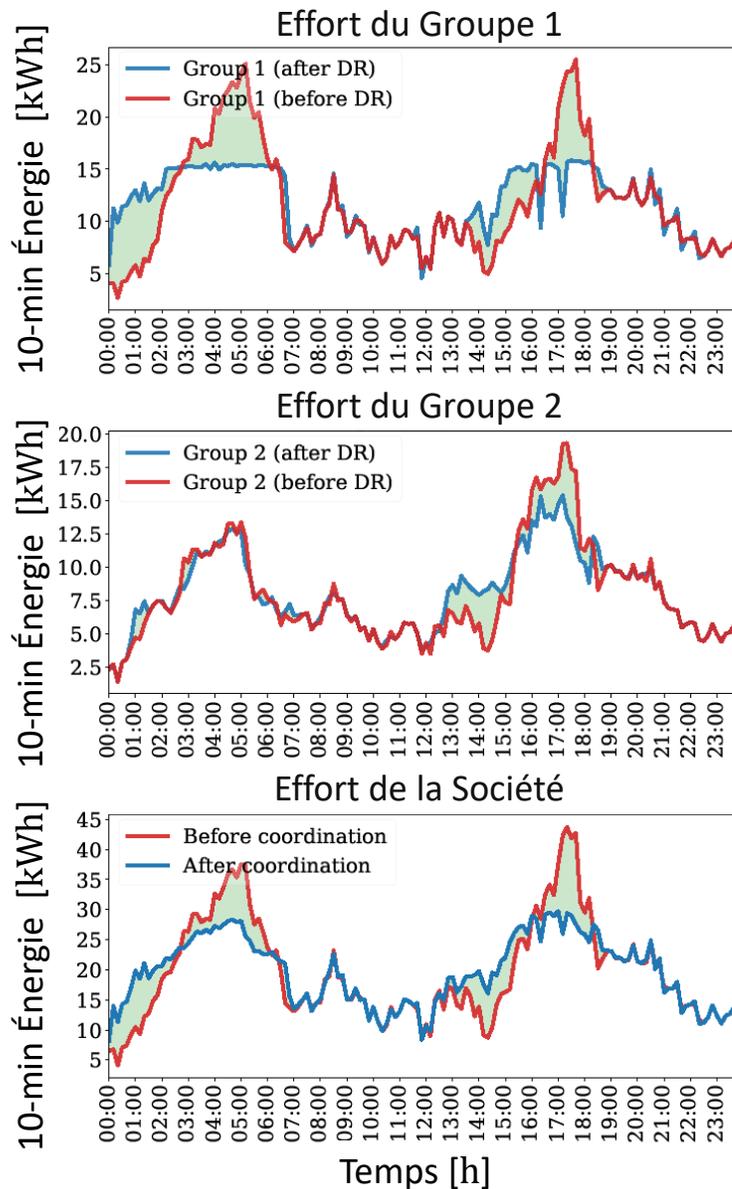
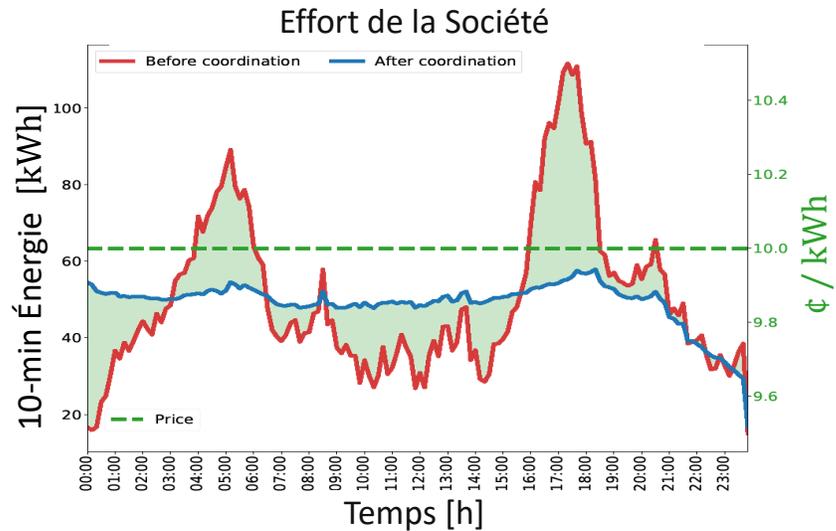


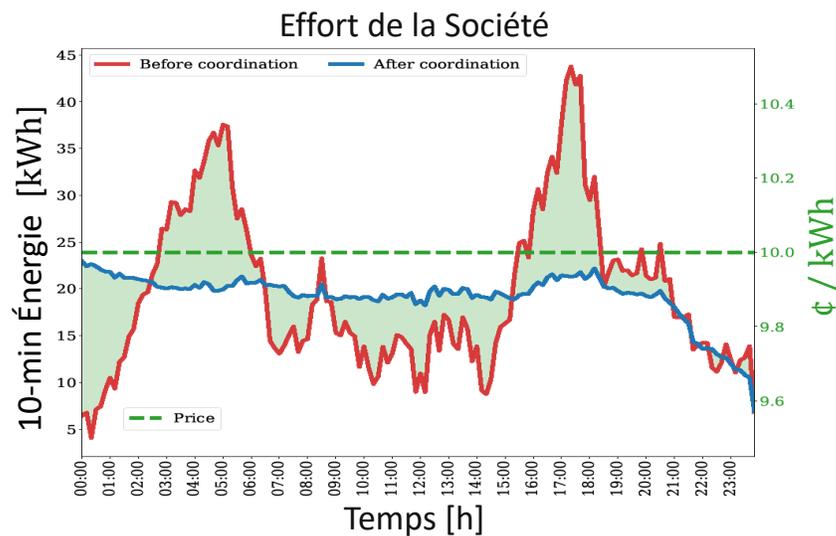
FIGURE 5-16 Les profils agrégés de la société et des groupes avant et après l'application des contraintes couplées de capacité énergétique maximale dans les transformateurs de la société et des groupes résidentiels. La limite : [Groupes :15 kWh, Société :30 kWh]

profil de la société dans le cas de base de 0,45 à 0,85. La zone verte de la Figure 5-17 met en évidence les changements apportés au profil agrégé de la société pour réviser le profil de base et le remplacer par le profil coordonné. La révision comprend une réduction de la consommation pendant les périodes de pointe et une augmentation pendant les périodes creuses.

L'approche de coordination proposée est équitable pour les consommateurs et les groupes résidentiels en ce qui concerne le moment et le prix en utilisant un prix fixe. Par exemple, si le



(a) Société à cinq groupes



(b) Société à deux groupes

FIGURE 5-17 Le profil agrégé de la société avant et après l'application de l'approche de coordination hiérarchique proposée, avec mise en évidence du prix et de l'effort de la société dans la révision de son profil.

prix n'est pas fixe et que le coordinateur demande à un client de se déplacer d'une période à bas prix vers une période à prix élevé, puis à un autre ménage de se déplacer d'une période à prix élevé vers une période à prix bas, la programmation n'est pas équitable. La Figure 5-17 (b) illustre les profils agrégés avant et après l'application de l'approche de coordination hiérarchique présentée avec le niveau maximal de coordination ($CR = 1$) pour une société comprenant deux groupes résidentiels. La société révisé son profil agrégé après la coordination

pour satisfaire les objectifs et les contraintes partagés/individuels. La Figure présente l'effort de la société pour réviser son profil agrégé. Dans le cas coordonné, la consommation de pointe de la société est réduite significativement.

La Figure 5-18 montre les profils des groupes résidentiels avant et après la coordination hiérarchique pour le niveau maximal de coordination ($CR = 1$). La Figure met en évidence les efforts déployés par chaque groupe pour réviser son profil. Dans l'étude de cas, la société comprend cinq groupes résidentiels. Ici, l'approche proposée n'aplatit pas le profil de chaque groupe. Au contraire, l'approche de coordination hiérarchique proposée permet aux groupes résidentiels d'agir de manière complémentaire. Ainsi, après la coordination, l'agrégation des profils des groupes permet d'aplatir le profil de la société dans la mesure où la flexibilité le permet.

La Figure 5-19 montre les profils des groupes résidentiels avant et après l'application de la coordination avec le niveau maximal pour une société composée de deux groupes résidentiels. La Figure met en évidence la contribution de chaque groupe résidentiel à la coordination et illustre l'effort de révision des profils des groupes. L'effort a été mis en évidence par des surfaces vertes, qui montrent la consommation d'énergie qui a été augmentée ou diminuée par chaque groupe. Comme le montre la Figure, chaque groupe, basé sur les variables globales envoyées par le coordinateur du réseau, modifie et optimise sa consommation spécifiquement pendant les heures de pointe.

La Figure 5-20 illustre les profils des groupes résidentiels après l'application de l'approche de coordination hiérarchique proposée avec le niveau maximum pour une société comprenant deux groupes. La Figure met en évidence l'action complémentaire des groupes résidentiels dans la société. Comme le montre la Figure, dans les périodes de temps où le groupe 1 a une consommation plus élevée, le groupe 2 réduit sa consommation. C'est pourquoi, dans la tranche de temps où un groupe a un pic (consommation maximale locale/globale), l'autre groupe essaie d'atteindre sa consommation minimale possible (consommation minimale locale/globale). En effet, le coordinateur du réseau conduit les coordinateurs locaux à répartir leurs pointes dans différents intervalles de temps au cours de la journée et à réduire au minimum le chevauchement entre les intervalles de temps des pointes des groupes. Chaque coordinateur local tient compte simultanément de ses objectifs/contraintes individuels, des décisions des

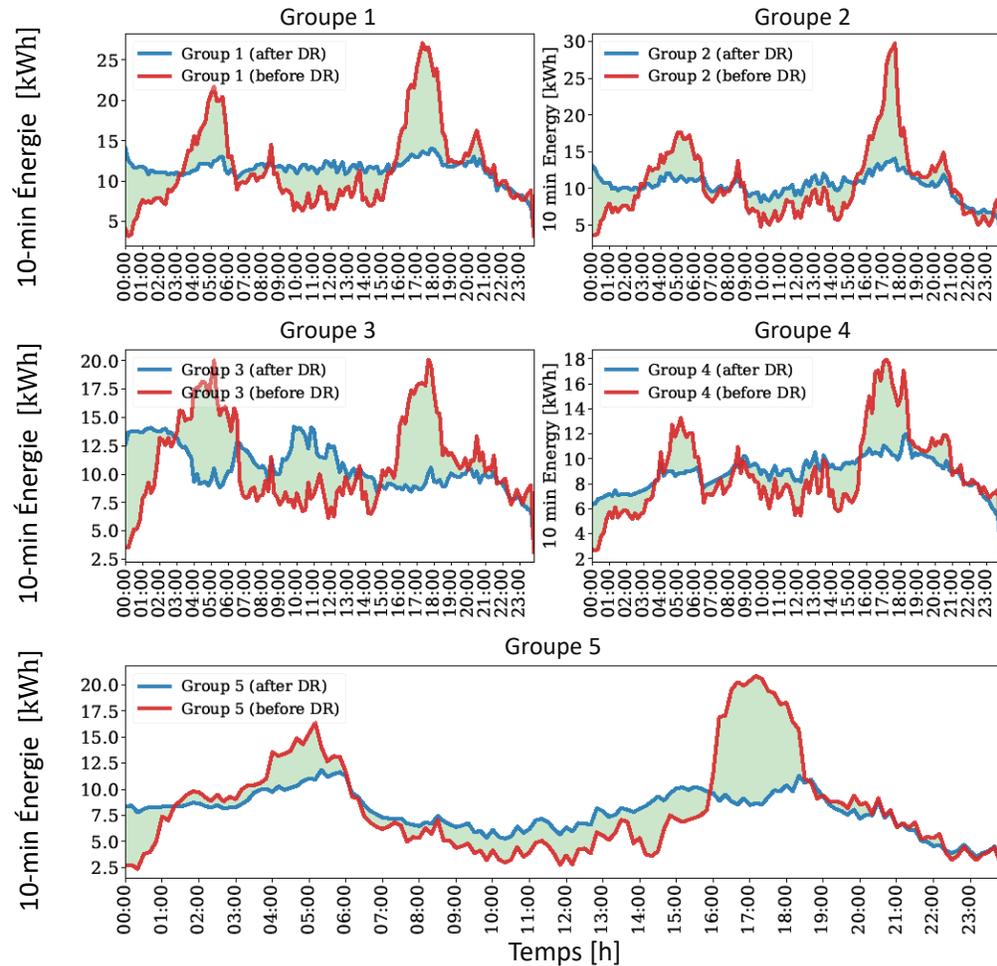


FIGURE 5-18 Profils des groupes résidentiels avant et après la coordination hiérarchique avec mise en évidence de l'effort de chaque groupe ($CR = 1$). La société comprend cinq groupes résidentiels.

autres groupes résidentiels et des objectifs/contraintes partagés par la société. Cela signifie que chaque groupe essaie de minimiser ses coûts et d'améliorer son facteur de charge ; cependant, pour améliorer le facteur de charge de la société et minimiser le coût total, ils ont des actions complémentaires. Par conséquent, l'agrégation des profils des groupes aplatit le profil de la société et minimise le coût total de la société. En outre, toutes les contraintes partagées (couplées) et individuelles de la société et des groupes ont été satisfaites au cours du processus de coordination hiérarchique.

L'approche de coordination hiérarchique présentée a été comparée à deux méthodes bien connues et au cas de référence pour mettre en évidence ses performances. Les approches de prix dynamiques et de coordination indépendante ont été utilisées pour la comparaison. Le

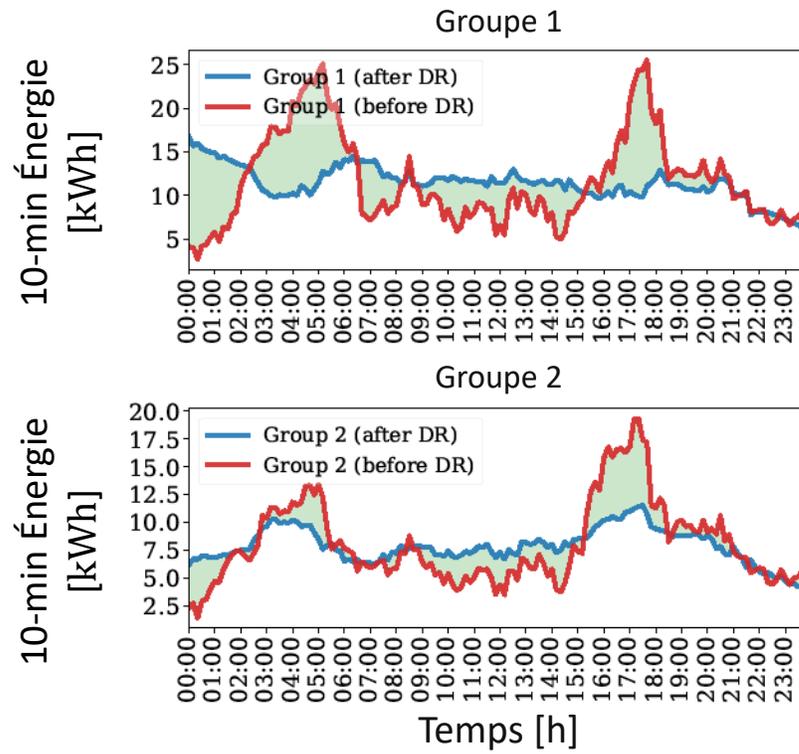


FIGURE 5-19 Profils des groupes résidentiels avant et après la coordination hiérarchique avec mise en évidence de l’effort de chaque groupe ($CR = 1$). La société comprend deux groupes résidentiels.

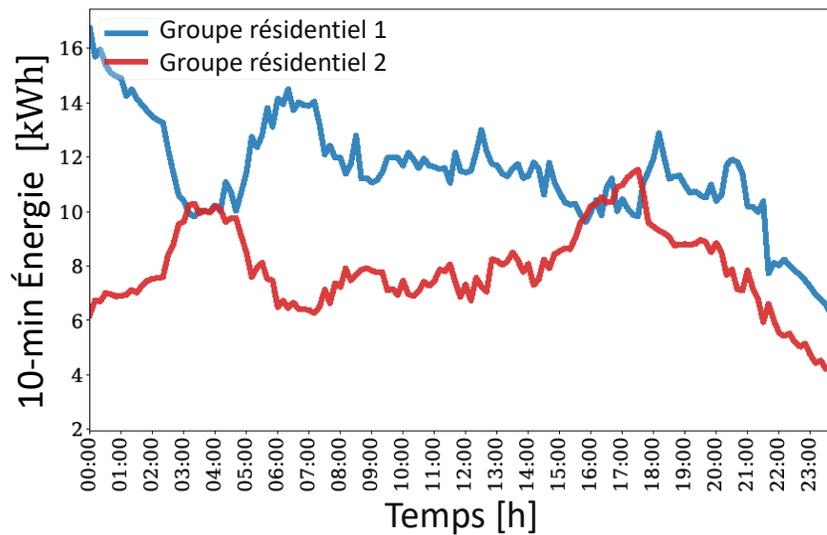


FIGURE 5-20 Profils des groupes résidentiels après la coordination hiérarchique avec mise en évidence de leur complémentarité d’action. La société comprend deux groupes résidentiels.

cas de base représente le cas sans application de programmes de réponse à la demande ou d'approches de coordination. Le prix dynamique représente le cas où l'on utilise un mécanisme de tarification qui met à jour le prix en fonction de la consommation agrégée dans la société. Tous les HEMS résolvent leur problème d'optimisation et mettent à jour leur profil en fonction du nouveau prix. Le processus est itératif et converge vers la solution finale lorsque le prix ne peut plus changer. Le prix dynamique est modélisé par $\pi = 0.52 * U_{\text{Société}}(kWh)$, dans lequel $U_{\text{Société}}$ représente le profil agrégé de la société.

L'approche de coordination indépendante proposée implique que chaque groupe résidentiel coordonne uniquement les HEMS de son groupe, qu'il n'y ait pas de communication ni de coordination avec d'autres groupes et que le cadre de coordination soit à un seul niveau plutôt que hiérarchique. En outre, les groupes ne satisfont que leurs objectifs et leurs contraintes couplées et ne tiennent pas compte des objectifs et des contraintes couplées de la société. Les profils agrégés de la société pour les cas de base, de prix dynamique, de coordination indépendante et de coordination hiérarchique proposés sont illustrés à la Figure 5-21. Les Figures 5-21 (a) et 5-21 (b) présentent les profils agrégés pour des sociétés comptant respectivement cinq et deux groupes résidentiels. Les approches de coordination hiérarchiques/indépendantes proposées fonctionnent parfaitement et améliorent considérablement le facteur de charge de la société. L'aplatissement du profil a été obtenu en raison de l'action complémentaire des consommateurs et de la répartition de leurs pics au cours de la journée par l'intermédiaire des systèmes de gestion de l'énergie coordonnés. La méthode du prix dynamique améliore le facteur de charge, mais conduit à un coût total plus élevé. En outre, l'approche du prix dynamique ne peut pas prendre en compte les défis (objectifs partagés) et les contraintes couplées à différents niveaux de la société. Au contraire, la coordination hiérarchique proposée a la capacité d'améliorer le facteur de charge avec un coût total plus bas et de prendre en compte les objectifs et les contraintes partagés à différents niveaux de la société. L'approche de coordination indépendante ne prend pas non plus en compte les contraintes couplées de la société et n'assure pas la coordination entre les groupes résidentiels.

En résumé, la coordination hiérarchique proposée permet d'utiliser la flexibilité des ménages pour résoudre les problèmes à différents niveaux et répondre aux contraintes de chaque niveau. L'approche présentée peut atteindre les avantages d'autres méthodes bien connues

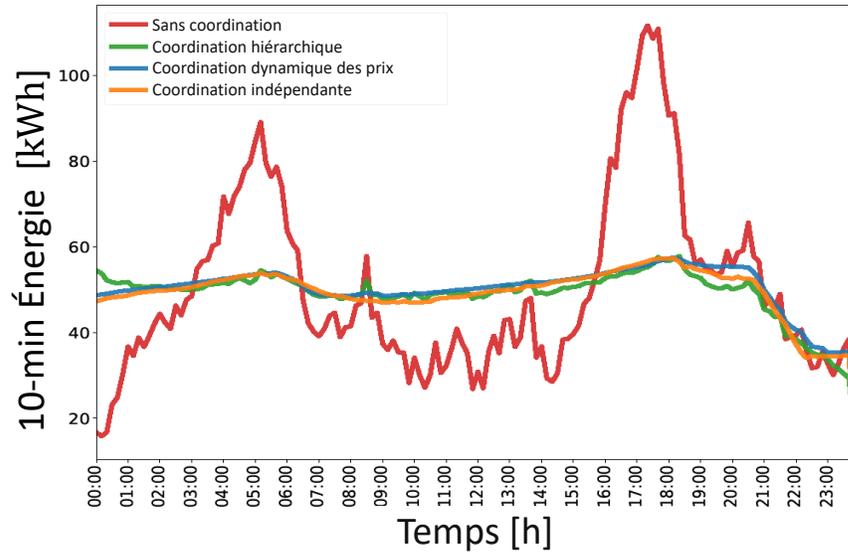
avec un coût énergétique plus faible et en tenant compte des objectifs/contraintes à différents niveaux. En outre, la coordination hiérarchique des HEMS présentée est extensible et peut être utilisée pour une société avec un nombre différent de groupes et de consommateurs. Comme l'illustre la fig. 5-21, la coordination HEMS hiérarchique présentée fonctionne correctement dans les sociétés à cinq et deux groupes.

Le Tableau 5-2 présente le résumé de la comparaison des résultats des approches pour une société comprenant cinq groupes résidentiels. D'après les résultats, le coût énergétique agrégé de la société pour les cas de base, de prix dynamique, de coordination indépendante proposée et de coordination hiérarchique proposée est respectivement de 120,47, 126,49, 118,39 et 117,88. En outre, le facteur de charge de la société pour les cas de base, de prix dynamique, de coordination indépendante et de coordination hiérarchique proposée est de 0,45, 0,86, 0,85 et 0,85, respectivement.

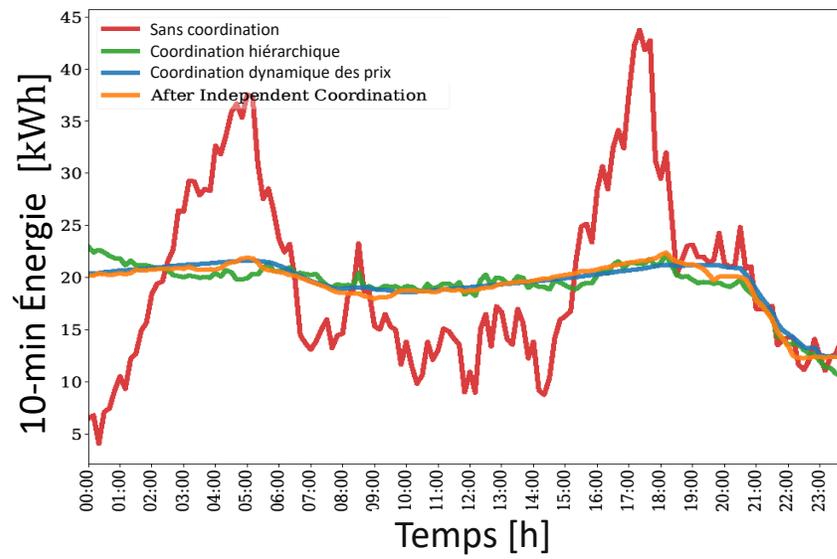
Le Tableau 5-3 résume les résultats des approches pour une société comprenant deux groupes résidentiels. Selon les résultats, le coût énergétique agrégé de la société pour les cas de base, de prix dynamique, de coordination indépendante proposée et de coordination hiérarchique proposée est respectivement de 49,16, 48,08, 46,22 et 46,12. En outre, le facteur de charge de la société pour les scénarios de référence, de prix dynamique, de coordination indépendante proposée et de coordination hiérarchique proposée est de 0,45, 0,87, 0,85 et 0,85, respectivement. Par conséquent, l'approche de coordination hiérarchique proposée optimise efficacement le coût agrégé et améliore le facteur de charge de la société.

TABLEAU 5-2 Comparaison des approches de coordination pour la société avec cinq groupes résidentiels

Coût énergétique agrégé pour la société [\$]					
<i>Approche hiérarchique proposée</i>		<i>Coordination indépendante proposée</i>		<i>Prix dynamique</i>	<i>Sans coordination</i>
après remise	avant remise	après remise	avant remise		
94.94	117.88	95.45	118.40	126.49	120.47
Facteur de charge du profil agrégé de la société					
<i>Approche hiérarchique proposée</i>		<i>Coordination indépendante proposée</i>		<i>Prix dynamique</i>	<i>Sans coordination</i>
0.85		0.85		0.87	0.45



(a) Société à cinq groupes



(b) Société à deux groupes

FIGURE 5-21 Comparaison des profils agrégés de la société pour les cas de base, de prix dynamique, de coordination indépendante et de coordination hiérarchique proposée.

TABLEAU 5-3 Comparaison des approches de coordination pour la société avec deux groupes résidentiels

Coût énergétique agrégé pour la société [\$]					
<i>Approche hiérarchique proposée</i>		<i>Coordination indépendante proposée</i>		<i>Prix dynamique</i>	<i>Sans coordination</i>
après remise	avant remise	après remise	avant remise	48.08	47.01
37.16	46.13	37.3	46.22		
Facteur de charge du profil agrégé de la société					
<i>Approche hiérarchique proposée</i>		<i>Coordination indépendante proposée</i>		<i>Prix dynamique</i>	<i>Sans coordination</i>
0.85		0.85		0.87	0.45

Les Figures 5-22 à 5-25 montrent les profils agrégés des cinq groupes résidentiels de la société pour différentes approches. Les profils des groupes résidentiels avant l'application de l'approche de coordination présentée ou de tout autre programme de réponse à la demande ont été illustrés dans les Figures 5-23 à 5-25. Dans le cas où l'approche de coordination proposée n'est pas appliquée, comme l'illustre dans la Figure 5-22, les pics des groupes se situent presque dans les mêmes périodes de temps, ce qui crée un pic significatif dans la société. En outre, ce cas conduit à des coûts énergétiques plus élevés pour les consommateurs, les groupes, et la société.

La Figure 5-23 montre les profils des groupes résidentiels dans le cadre de l'approche par le prix dynamique. L'approche par le prix dynamique conduit à un coût énergétique plus élevé et ne répond pas aux objectifs partagés et aux contraintes couplées à différents niveaux de la société.

Les profils des groupes résidentiels après l'application de la méthode de coordination indépendante sont présentés dans la Figure 5-24. La coordination indépendante ne tient pas compte des contraintes couplées et des objectifs partagés au niveau supérieur (société) et ne coordonne pas les coordinateurs locaux. Comme le montre la Figure, il n'y a pas d'actions complémentaires entre les groupes.

La Figure 5-25 illustre les profils des groupes après la coordination hiérarchique des HEMS et met en évidence l'action complémentaire des groupes résidentiels. Comme le montre la Figure, les périodes de pointe de chaque groupe ont été réparties au cours de la journée de manière à ce que les périodes de pointe se chevauchent le moins possible entre les groupes. En

effet, lorsqu'un groupe est dans sa période de pointe, les autres groupes essaient de diminuer leur consommation. Dans l'approche de coordination proposée, nous ne tenons pas compte de la planéité du profil de chaque ménage ou de chaque groupe. En fait, l'aplatissement du profil de la société est garanti par l'action complémentaire des acteurs au lieu d'aplatir les profils des acteurs individuellement. Par exemple, dans la Figure 5-25, à l'intervalle de temps 2, la consommation maximale du groupe 3 est d'environ 14 kWh ; cependant, les autres groupes ont une consommation plus faible ou atteignent leur minimum local. En effet, la coordination hiérarchique présentée tente d'optimiser les profils de consommation d'énergie des ménages, des groupes et de la société, et d'aplanir les profils des groupes et de la société par des actions complémentaires des acteurs. En outre, les consommateurs d'un même groupe résidentiel ont des actions complémentaires et leur profil agrégé permet d'aplanir le profil agrégé du groupe sans aplanir le profil de chaque client.

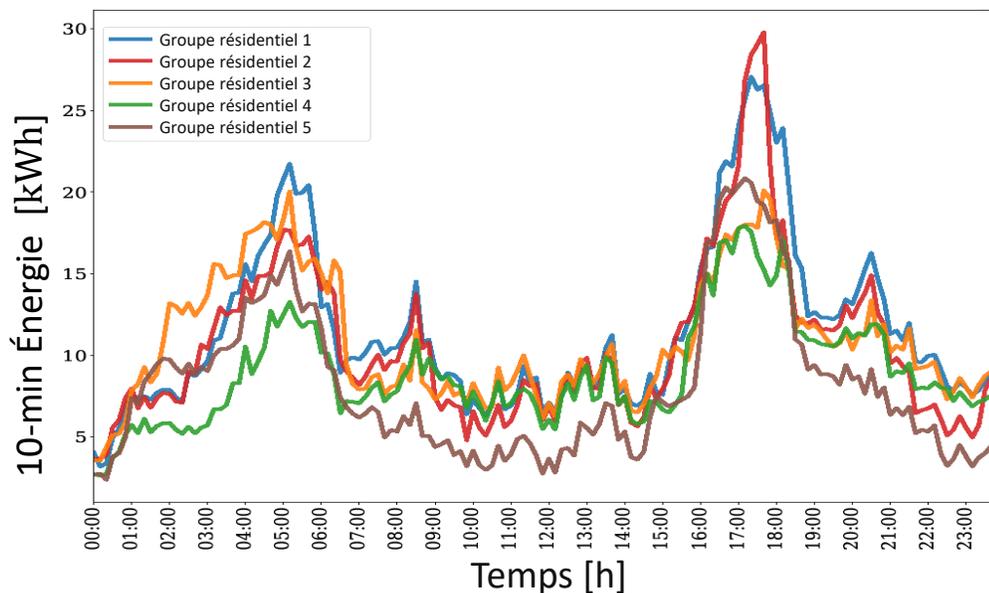


FIGURE 5-22 Profil agrégé des groupes résidentiels avant l'application de l'approche de coordination proposée.

La performance du mécanisme de partage du gain total proposé a été étudiée ici. Ce mécanisme répartit le gain total de la société entre les groupes résidentiels en fonction de leur contribution à la coordination. Ensuite, le gain de chaque groupe est distribué entre les consommateurs en fonction de leur effort pour réviser leur profil. L'étude de cas pour tester le mécanisme de partage des gains est une société comprenant deux groupes résidentiels. L'étude

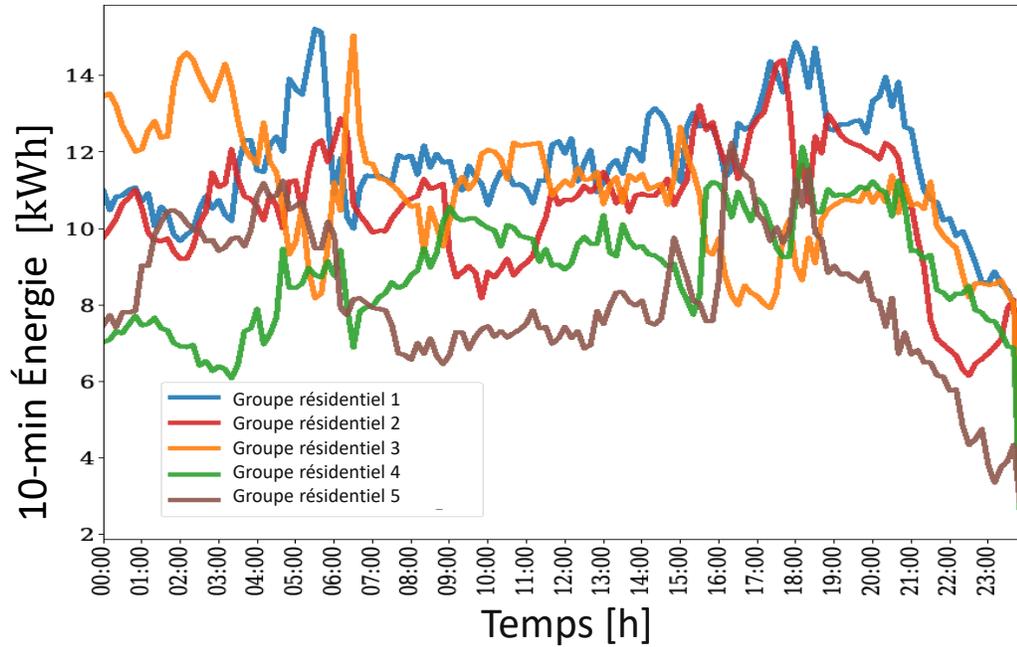


FIGURE 5-23 Profil agrégé des groupes résidentiels après application de l'approche dynamique des prix.

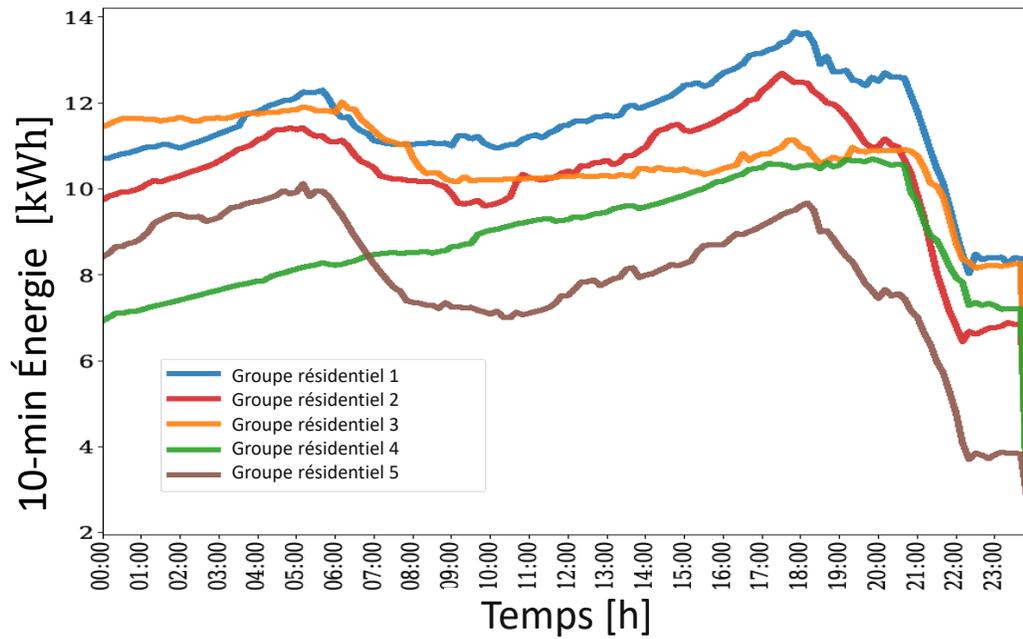


FIGURE 5-24 Profil agrégé des groupes résidentiels après application de l'approche de coordination indépendante proposée.

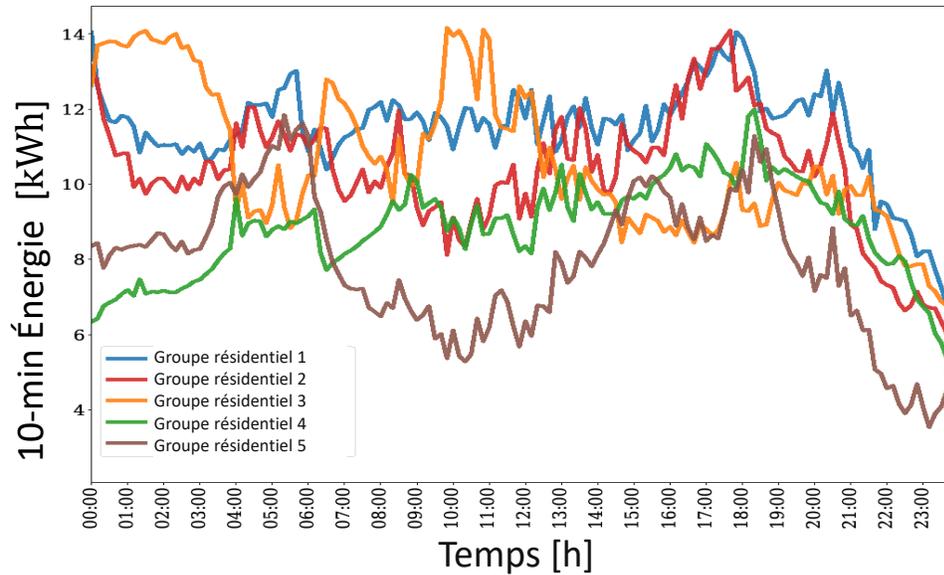


FIGURE 5-25 Profil agrégé des groupes résidentiels après application de l'approche de coordination hiérarchique proposée.

de cas est la même que celle utilisée dans les Figures 5-19 et 5-20. La société comprend deux groupes résidentiels : le groupe 1 possède 15 SH et le groupe 2 comprend 10 ménages. La contribution marginale de chaque groupe résidentiel à la coordination dans la société a été calculée en quantifiant leur effort mis en évidence dans 5-19. Nous avons utilisé (4.57), (4.59) et (4.62) pour mesurer et quantifier la contribution marginale de chaque groupe et calculer en conséquence la part de chaque groupe dans le gain total de la société.

La Figure 5-26 illustre la part de chaque groupe résidentiel après la coordination hiérarchique dans la société, comprenant deux groupes. La part de chaque groupe a été indiquée en pourcentage pour mettre en évidence la différence entre les parts. Comme le montre la Figure, la part de chaque groupe est exprimée en pourcentage afin de mettre en évidence la différence entre les parts. 5-19, la contribution du groupe 1 est plus élevée que celle du groupe 2. Le mécanisme de partage des gains proposé attribue près de 70% des gains au groupe 1 et 30% au groupe 2. Le groupe 1 obtient une part plus élevée parce que sa contribution marginale normalisée est supérieure à celle de l'autre groupe. Le mécanisme de partage est équitable car il est calculé sur la base des contributions marginales des joueurs, et les valeurs de toutes les coalitions possibles ont été mesurées par leur révision de profil normalisée. En outre, la contribution marginale a été calculée en calculant la moyenne de toutes les contributions

marginales, qui sont calculées du point de vue de chaque joueur. En effet, sur la base de (4.59), tous les ordres (permutations) possibles pour l'entrée d'un joueur dans la grande coalition ont été pris en compte pour calculer les contributions marginales. Ainsi, le mécanisme de partage des gains proposé est équitable dans le calcul et la distribution des parts.

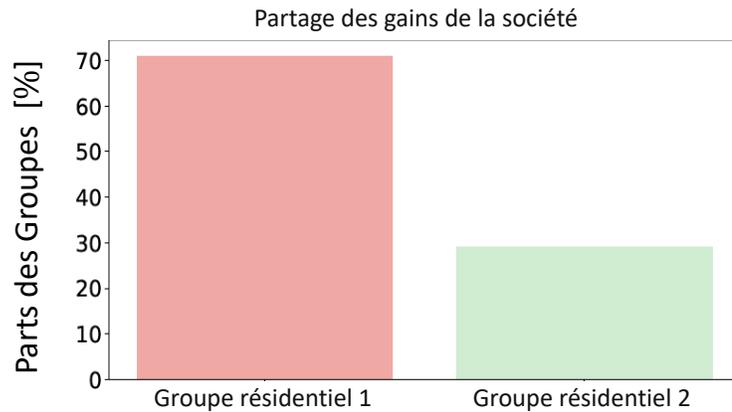


FIGURE 5-26 Part de chaque groupe résidentiel dans le gain total de la société

Après le calcul des parts des groupes, le gain de chaque groupe doit être réparti entre les clients correspondants. Nous avons utilisé (4.58), (4.60) et (4.63) pour mesurer et quantifier la contribution marginale de chaque client et calculer en conséquence la part de chaque ménage à partir du gain du groupe correspondant. Tout d'abord, pour répartir le gain de chaque groupe entre ses consommateurs, il est essentiel de mesurer leurs efforts de coordination. Les efforts des SH du groupe 1 et du groupe 2 pour réviser leur profil ont été mis en évidence dans la Figure 5-27 et la Figure 5-28, respectivement.

Les résultats montrent que les niveaux de flexibilité des ménages sont différents. Certains consommateurs ont des préférences plus modulables et sont plus flexibles dans leur contribution à la coordination. Par exemple, les SH 4, 5, 6, 7, 9, 13, 14 et 15 du groupe 1 ont des niveaux de flexibilité plus élevés que les autres. De même, les SH 1, 4, 7 et 9 contribuent plus que les autres maisons du groupe 2. Au contraire, certains clients ont des préférences strictes et, par conséquent, ont des niveaux de flexibilité plus faibles, ou même n'ont pas de flexibilité. Par exemple, le ménage 2 du groupe 1 n'a pratiquement aucune flexibilité et préfère ne pas contribuer à la coordination. Les SH 8 et 10 du groupe 1 et les ménages 3, 5 et 10 du groupe 2 contribuent très peu à la coordination. En outre, certains consommateurs, tels que les SH 1, 3,

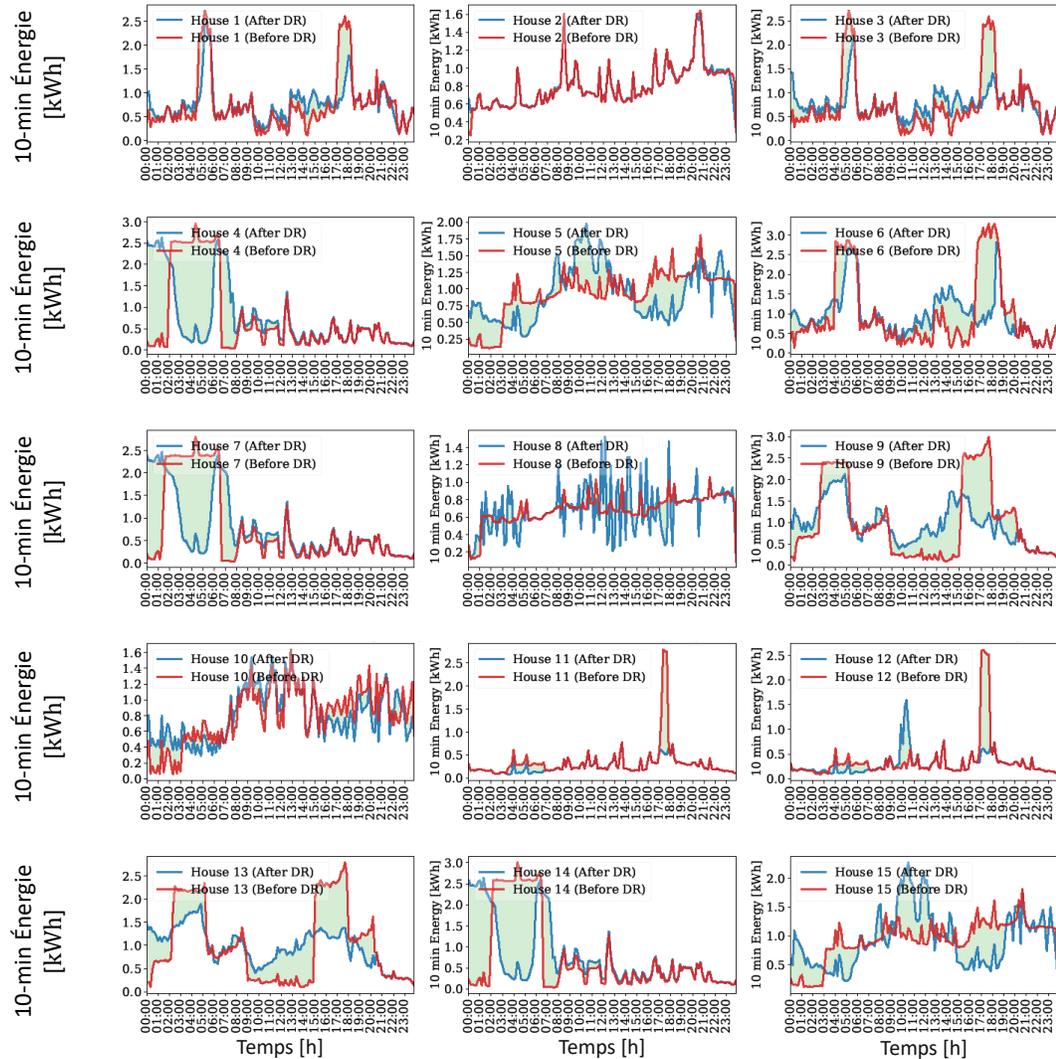


FIGURE 5-27 L'effort de chaque ménage dans le groupe résidentiel 1

11 et 12 du groupe 1 et les maisons 2, 6 et 8 du groupe 1 ont de faibles niveaux de flexibilité par rapport aux autres clients.

La Figure 5-29 montre la part de chaque ménage dans le gain de son groupe après la coordination hiérarchique. Comme le montre la Figure 5-27, la part de chaque consommateur est présentée en pourcentage pour souligner la différence entre les parts. 5-27 et fig. 5-28, les contributions des ménages sont différentes, ce qui conduit à attribuer une part plus importante au consommateur dont la contribution est la plus élevée. Le mécanisme de partage des gains proposé attribue des parts plus élevées aux maisons 4 et 14 du groupe 1 et à le ménage 1 du groupe 2 parce qu'elles ont la contribution marginale la plus élevée à la coordination. Au

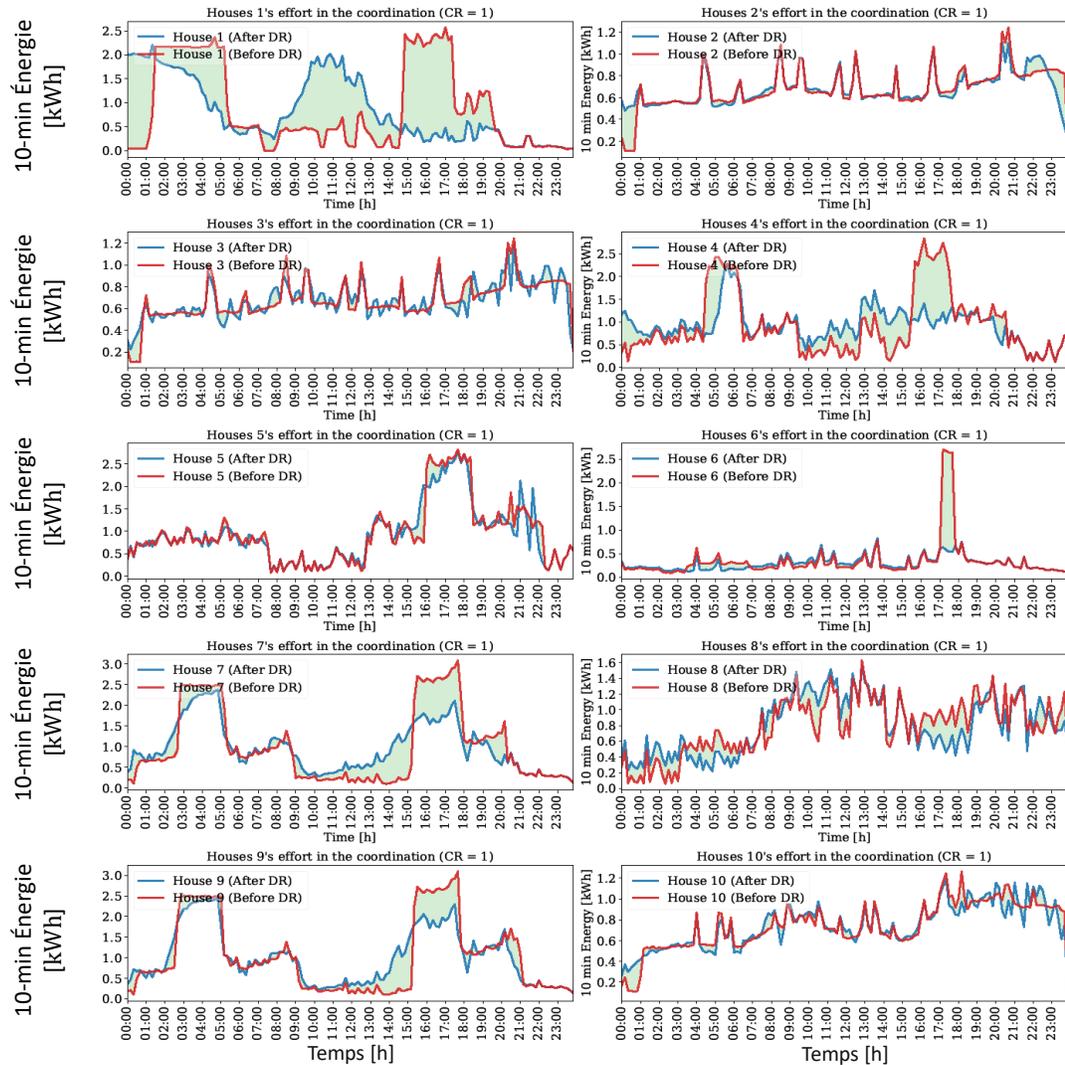


FIGURE 5-28 L'effort de chaque ménage dans le groupe résidentiel 2

contraire, les SH 2, 8 et 10 du groupe 1 et les maisons 2, 3, 5 et 10 du groupe 2 méritent les parts les plus faibles parce qu'elles ont les contributions marginales les plus faibles.

En conclusion, les consommateurs dont la contribution marginale normalisée est la plus élevée sont identifiés comme des contributeurs significatifs (ménages très flexibles) et méritent des parts importantes. Le mécanisme de partage du groupe est équitable car il est calculé sur la base des contributions marginales des clients, et les valeurs de toutes les coalitions possibles ont été calculées en fonction de la révision normalisée de leur profil. La contribution marginale a été calculée par (4.60) pour prendre la moyenne de toutes les contributions marginales du point de vue de chaque SH. Toutes les permutations pour l'entrée d'un consommateur

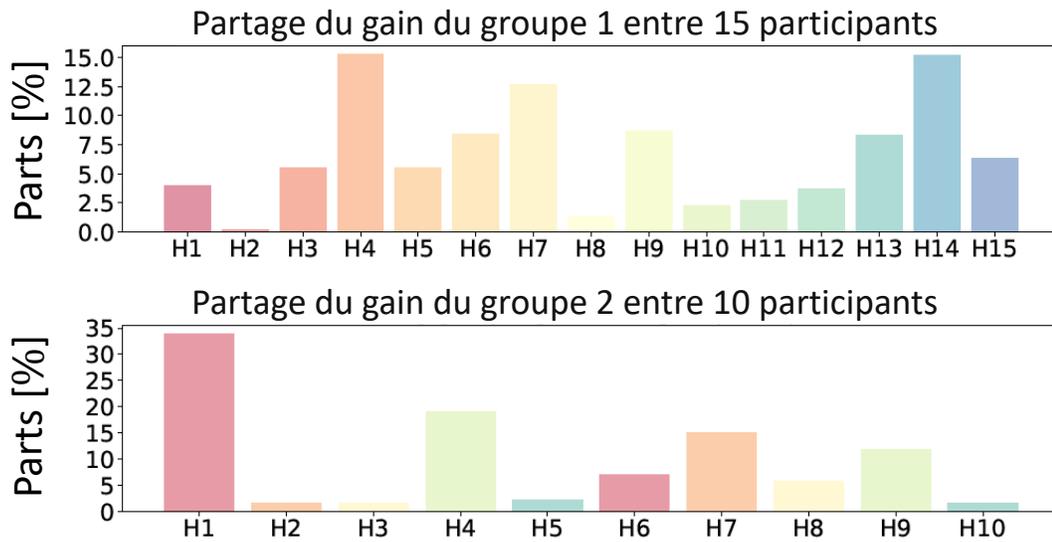


FIGURE 5-29 Part de chaque ménage dans le gain total de son groupe associé

dans la grande coalition (dans son groupe résidentiel) ont été prises en compte pour calculer les contributions marginales. Par conséquent, le mécanisme de partage des gains du groupe proposé est équitable dans le calcul et l'attribution des parts.

Chapitre 6 - Conclusions et Recommandations

Ce chapitre conclut l'étude en résumant les principaux résultats de ce projet de recherche par rapport aux objectifs et aux questions définies en amont ; et en discutant de la valeur et de la contribution de ces derniers. Ce chapitre présente également plusieurs recommandations pour le développement de ce travail et liste les publications réalisées dans le cadre de cette thèse.

6.1 Conclusions

Cette thèse a suggéré des modèles d'agents coopératifs et a suggéré une coordination transactionnelle des systèmes de gestion de l'énergie domestique. Une nouvelle technique de coordination distribuée et transactionnelle a été proposée, ainsi que la topologie requise correspondante, pour coordonner les systèmes de gestion de l'énergie domestique dans un voisinage afin de satisfaire les objectifs individuels et partagés. Le travail présenté a élaboré un mécanisme pour former un consensus et distribuer des objectifs partagés entre les utilisateurs. Cette coordination a conduit à des décisions et des actions complémentaires des agents. En outre, une politique d'incitation a été conçue pour encourager les consommateurs à participer à la coordination. Cette thèse a inventé un mécanisme de partage des gains pour mesurer les contributions des ménages dans un groupe et distribuer le gain total entre eux de manière équitable. En plus, ce travail a proposé un mécanisme compatible avec les incitations pour s'assurer de la véracité des déclarations des consommateurs. Ensuite, le travail présenté a étendu la coordination des utilisateurs dans un groupe résidentiel à une coordination hiérarchique des groupes dans une société. Un mécanisme pour partager les objectifs communs de la société entre les coordinateurs locaux et pour partager les objectifs communs des coordinateurs locaux entre les ménages d'un même groupe a été proposé. La thèse a élaboré un nouveau mécanisme

permettant un partage des contraintes couplées, de relier les niveaux supérieurs et inférieurs de la société, et de satisfaire les contraintes couplées de chaque niveau. Un mécanisme de partage des gains a été également conçu afin de distribuer équitablement le gain total du niveau le plus élevé de la hiérarchie au niveau le plus bas (clients). Enfin, cette thèse a étudié l'impact de la coordination sur l'aplatissement du profil agrégé, la consommation agrégée, le profil du ménages, la part de gain du consommateur et le gain total ; et a pris en compte l'adaptation aux standards, aux tarifs d'électricité et aux conditions climatiques particulières au Québec.

Ce travail présente une nouvelle coordination distribuée et transactionnelle des HEMS avec des thermostats de plinthes électriques activés par la réponse à la demande dans un groupe résidentiel afin d'atteindre simultanément l'objectif individuel et l'objectif partagé. La technique de coordination proposée intègre une politique d'incitation couplée à un mécanisme compatible avec les incitations qui encouragent les clients à participer et garantissent la véracité de leurs déclarations. Le mécanisme de partage des récompenses basé sur la valeur de Shapley a été conçu pour distribuer le gain de l'équipe entre les joueurs en se basant sur leur contribution à la coordination. Les simulations visant à tester l'efficacité de l'approche ont été effectuées sur la base de données réelles de maisons. L'algorithme de coordination proposé a permis d'obtenir un consensus entre les agents et le coordinateur dans le groupe résidentiel. Par ailleurs, les résultats des simulations ont révélé la robustesse de l'algorithme proposé pour différentes études de cas et différents scénarios. La coordination des HEMS a amélioré le facteur de charge du profil agrégé de 0,45 à 0,85 et a réduit la facture d'électricité agrégée du groupe résidentiel jusqu'à 21,4%. L'algorithme a répondu efficacement aux différentes préférences des utilisateurs et aux différents niveaux de coordination.

En outre, ce travail a proposé une coordination hiérarchique (multi-niveaux) et transactionnelle d'une société comprenant plusieurs groupes résidentiels. Les groupes possèdent des maisons équipées de plinthes chauffantes électriques activées par la réponse à la demande. La coordination hiérarchique satisfait les objectifs, les préférences et les contraintes des consommateurs. La coordination répondait aux objectifs partagés et aux contraintes couplées des coordinateurs locaux et des coordinateurs du réseau à différents niveaux de la société. Cette thèse a présenté un mécanisme permettant de partager les objectifs communs des coordinateurs locaux et du réseau entre les ménages afin d'atténuer les défis spécifiques à chaque niveau de

la société. Afin de relier les niveaux supérieurs et inférieurs et de répondre aux contraintes couplées, un mécanisme de partage des contraintes couplées a été conçu. Par ailleurs, ce travail a élaboré un mécanisme de partage des gains pour allouer le gain total du niveau le plus élevé de la société aux consommateurs du niveau le plus bas. Les performances de la coordination hiérarchique, du mécanisme de partage des contraintes couplées et du mécanisme de partage des gains pour différentes études de cas ont été examinées. La coordination des groupes résidentiels proposée améliore le facteur de charge du profil agrégé de la société de 0,45 à 0,85 et réduit la facture d'électricité agrégée de la société de 6,2%.

6.2 Recommandations

La présente thèse peut être interprétée comme une première étape dans la recherche sur la coordination des systèmes de gestion de l'énergie. Cependant, les opportunités de recherche suivantes doivent être approfondies pour explorer les implications des résultats de la thèse concernant les hypothèses données, développer le travail pour les cas sans nos hypothèses, et faciliter la mise en œuvre pratique de l'approche de coordination proposée.

- **Plateforme (banc de test) :** Valider l'approche de coordination proposée à l'aide d'une plateforme (banc de test) pour les cas de coordination à un-niveau et à multi-niveaux (hiérarchique). Les profils énergétiques des utilisateurs, leurs préférences, la communication entre les agents, les défaillances de la communication et le temps de traitement peuvent être étudiés.
- **Incertitude :** Dans le présent travail, nous avons supposé que le processus de prise de décision était déterministe et nous n'avons pas pris en compte l'effet des incertitudes dans le processus de prise de décision des agents. Dans les études futures, il est recommandé d'étudier l'effet de différentes sources d'incertitudes sur l'approche de coordination proposée. Les sources d'incertitudes peuvent être les profils de consommation, les préférences des consommateurs (point de consigne et occupation), le taux de récompense, le prix, les générations renouvelables et les prévisions météorologiques. Il est intéressant d'étudier l'effet de la propagation des incertitudes aux différents niveaux de la hiérarchie entre les agrégateurs, les coordinateurs et les consommateurs sur les approches de coordination proposées.

- **Négociation entre l'agrégateur et le coordinateur :** Dans le travail présenté, nous avons considéré trois niveaux d'optimisation dans la coordination des ménages d'un groupe résidentiel. Les optimisations au niveau du consommateur (optimisation non-coordonnée) et au niveau du coordinateur (coordination) ont été étudiées en détail. Cependant, dans ce travail, nous avons supposé que la négociation entre le coordinateur et l'agrégateur était terminée et qu'ils s'étaient mis d'accord sur une fonction de récompense spécifique (incitation par rapport au facteur de charge du profil agrégé). Cette négociation entre le coordinateur et l'agrégateur peut être étudiée plus en détail pour, par exemple, modéliser les coûts de production et de maintenance.
- **Agents hétérogènes :** Dans le présent travail, nous avons supposé que les consommateurs d'un groupe résidentiel étaient homogènes et nous avons modélisé leurs préférences et le modèle thermique de chaque maison en se basant sur des données expérimentales. Par conséquent, dans un groupe résidentiel, il y avait différentes tailles de maisons et différents comportements des utilisateurs, mais les différences n'étaient pas trop grandes. L'étude de cas, incluant des consommateurs minuscules et énormes, peut être étudiée dans de futures recherches. En particulier, la prise en compte des agents hétérogènes dans le mécanisme de partage des gains et la satisfaction de l'équité à la fois pour le partage des récompenses et la contribution à la coordination peuvent être explorées.
- **Autres sources de flexibilité :** Dans la présente étude, nous n'avons considéré que les plinthes électriques comme source de flexibilité pour les ménages pour souligner l'importance des chauffages électriques dans les régions froides et mettre en évidence l'effet de la coordination d'un équipement dans le groupe. Cependant, dans les recherches futures, d'autres équipements tels que les énergies renouvelables, les véhicules électriques, les batteries, les chauffe-eaux et d'autres systèmes d'énergie distribuée peuvent être considérés comme des sources de flexibilité pour les clients dans le cadre de la coordination.
- **Analyse à long terme :** Il est bénéfique d'analyser les performances à long terme (au-delà de 24 heures) de l'approche de coordination.

6.3 Publications

Les contributions et résultats de cette thèse ont été diffusés à travers les articles publiés suivants.

1. Etedadi, F., Kelouwani, S., Agbossou, K., Henao, N. & Laurencelle, F. Consensus and sharing based distributed coordination of home energy management systems with demand response enabled baseboard heaters. *Appl. Energy* 336, 120833 (2023).
2. Etedadi Aliabadi, F., Agbossou, K., Kelouwani, S., Henao, N. & Hosseini, S. S. Coordination of Smart Home Energy Management Systems in Neighborhood Areas : A Systematic Review. *IEEE Access* 9, 36417–36443 (2021).
3. Aliabadi, F. E., Agbossou, K., Henao, N., Kelouwani, S. & Laurencelle, F. Distributed Residential Demand Response Using Building Mass and Electric Thermal Storage System. *2022 IEEE 10th Int. Conf. Smart Energy Grid Eng.* 19–25 (2022). doi :10.1109/SEGE55279.2022.9889758
4. Etedadi, F. et al. Bi-Level Transactive Coordination of Energy Management Systems in a Community. in *2023 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)* 1–6 (2023). doi :10.1109/TPEC56611.2023.10078524
5. Etedadi, F., Kelouwani, S., Agbossou, K., Henao, N., Laurencelle, F., & Hosseini, S. S. Hierarchical Transactive Home Energy Management System Groups Coordination through Multi-Level Consensus Sharing-Based Distributed ADMM (submitted to *Energy and Building journal*)

Bibliographie

- [1] *New England's Reliability Outlook : Four Pillars for the Clean Energy Transition - ESIG*. (visité le 25/10/2023).
- [2] *Exploring Canada's Energy Future - Canada Energy Regulator*. (visité le 25/10/2023).
- [3] J. OLIVIER et J. PETERS, « Trends in Global CO₂ and Total Greenhouse Gas Emissions : Report 2019, » *PBL Netherlands Environmental Assessment Agency*, t. 2020, p. 70, 2020. adresse : www.pbl.nl/en..
- [4] S. NIŽETIĆ, N. DJILALI, A. PAPADOPOULOS et J. J. RODRIGUES, *Smart technologies for promotion of energy efficiency, utilization of sustainable resources and waste management*, 2019. DOI : [10.1016/j.jclepro.2019.04.397](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.397).
- [5] R. M. ELAVARASAN, G. SHAFIULLAH, S. PADMANABAN et al., *A Comprehensive Review on Renewable Energy Development, Challenges, and Policies of Leading Indian States with an International Perspective*, 2020. DOI : [10.1109/ACCESS.2020.2988011](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988011).
- [6] F. NADEEM, S. M. HUSSAIN, P. K. TIWARI, A. K. GOSWAMI et T. S. USTUN, *Comparative review of energy storage systems, their roles, and impacts on future power systems*, 2019. DOI : [10.1109/ACCESS.2018.2888497](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2888497).
- [7] X. YU, C. CECATI, T. DILLON et M. G. SIMÕES, « The New Frontier of Smart Grids, » *IEEE Industrial Electronics Magazine*, t. 5, n° 3, p. 49-63, 2011. DOI : [10.1109/MIE.2011.942176](https://doi.org/10.1109/MIE.2011.942176).
- [8] *Worldwide Technological Revolutions and Its Challenges under Smart Grid Paradigm : A Comprehensive Study*. (visité le 19/09/2021).

- [9] F. ETEDADI, K. AGBOSSOU, S. KELOUWANI, N. HENAO et S. HOSSEINI, « Coordination of Smart Home Energy Management Systems in Neighborhood Areas : A Systematic Review, » *IEEE Access*, t. 9, p. 36 417-36 443, 2021. DOI : [10.1109/ACCESS.2021.3061995](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3061995). adresse : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9363112/>.
- [10] B. P. ESTHER et K. S. KUMAR, « A survey on residential demand side management architecture, approaches, optimization models and methods, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 59, p. 342-351, 2016.
- [11] M. AMER, A NAAMAN, N. M'SIRDI et A. EL-ZONKOLY, « Smart home energy management systems survey, » in *Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), 2014 International Conference on*, IEEE, 2014, p. 167-173.
- [12] R. TEIVE et S. VILVERT, « Demand side management for residential consumers by using direct control on the loads, » 2002.
- [13] V. M. BALIJEPALLI, V. PRADHAN, S. KHAPARDE et R. SHEREEF, « Review of demand response under smart grid paradigm, » in *Innovative Smart Grid Technologies-India (ISGT India), 2011 IEEE PES*, IEEE, 2011, p. 236-243.
- [14] Q QDR, « Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them, » *US department of energy*, 2006.
- [15] JUNEJA PRACHI, *Definition of Coordination*. (visité le 04/02/2020).
- [16] A. SAFDARIAN, M. FOTUHI-FIRUZABAD et M. LEHTONEN, « Optimal Residential Load Management in Smart Grids : A Decentralized Framework, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 7, n° 4, p. 1836-1845, 2016. DOI : [10.1109/TSG.2015.2459753](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2459753). adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7202880/>.
- [17] S. FAN, Z. LI, J. WANG, L. PIAO et Q. AI, « Cooperative Economic Scheduling for Multiple Energy Hubs : A Bargaining Game Theoretic Perspective, » *IEEE Access*, t. 6, p. 27 777-27 789, 2018. DOI : [10.1109/ACCESS.2018.2839108](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2839108).
- [18] A. KHALID, N. JAVAID, M. GUIZANI, M. ALHUSSEIN, K. AURANGZEB et M. ILAHI, « Towards Dynamic Coordination among Home Appliances Using Multi-Objective

- Energy Optimization for Demand Side Management in Smart Buildings, » *IEEE Access*, t. 6, p. 19 509-19 529, 2018. DOI : [10.1109/ACCESS.2018.2791546](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2791546).
- [19] B. ZHOU, Y. CAO, C. LI et al., « Many-criteria optimality of coordinated demand response with heterogeneous households, » *Energy*, t. 207, p. 118 267, 2020. DOI : [10.1016/j.energy.2020.118267](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118267).
- [20] Z. YI, D. SCOFFIELD, J. SMART et al., « A highly efficient control framework for centralized residential charging coordination of large electric vehicle populations, » *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, t. 117, p. 105 661, 2020. DOI : [10.1016/j.ijepes.2019.105661](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105661). adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142061519321775>.
- [21] Z. CHENG, Z. LI, J. LIANG, J. SI, L. DONG et J. GAO, « Distributed coordination control strategy for multiple residential solar PV systems in distribution networks, » *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, t. 117, p. 105 660, 2020. DOI : [10.1016/j.ijepes.2019.105660](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105660).
- [22] M. KERSIC, T. BOCKLISCH, M. BÖTTIGER et L. GERLACH, « Coordination Mechanism for PV Battery Systems with Local Optimizing Energy Management, » *Energies*, t. 13, n° 3, p. 611, 2020. DOI : [10.3390/en13030611](https://doi.org/10.3390/en13030611). adresse : <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/3/611>.
- [23] A. KARGARIAN, J. MOHAMMADI, J. GUO et al., « Toward Distributed/Decentralized DC Optimal Power Flow Implementation in Future Electric Power Systems, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 9, n° 4, p. 2574-2594, 2018. DOI : [10.1109/TSG.2016.2614904](https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2614904).
- [24] B. CELIK, R. ROCHE, D. BOUQUAIN, A. MIRAOUI, T. HANSEN et S. SURYANARAYANAN, « Increasing local renewable energy use in smart neighborhoods through coordinated trading, » in *Cyber-Physical-Social Systems and Constructs in Electric Power Engineering*, 2016, chap. 9. DOI : [10.1049/pbpo081e_ch9](https://doi.org/10.1049/pbpo081e_ch9).
- [25] S. BAHRAMI et M. H. AMINI, « A decentralized trading algorithm for an electricity market with generation uncertainty, » *Applied Energy*, t. 218, p. 520-532, 2018. DOI :

- 10.1016/j.apenergy.2018.02.157. adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261918302915>.
- [26] H. R. GHOLINEJAD, A. LONI, J. ADABI et M. MARZBAND, « A hierarchical energy management system for multiple home energy hubs in neighborhood grids, » *Journal of Building Engineering*, t. 28, p. 101 028, 2020. DOI : [10.1016/j.jobbe.2019.101028](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101028).
- [27] *Pando - LO3 Energy*, 2020. (visité le 25/09/2020).
- [28] LO3 ENERGY, *Brooklyn Microgrid - Community Powered Energy*, 2020. (visité le 25/09/2020).
- [29] *Say hello to Hilo! | Hydro-Québec*, "Accessed : 2020-09-25", 2020.
- [30] M. JADIDBONAB, B. MOHAMMADI-IVATLOO, M. MARZBAND et P. SIANO, « Short-term Self-Scheduling of Virtual Energy Hub Plant within Thermal Energy Market, » *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, p. 1-1, 2020. DOI : [10.1109/TIE.2020.2978707](https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2978707). adresse : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9032308/>.
- [31] OPENADR, *About Open ADR*, <http://www.openadr.org/overview>, Accessed : 2020-09-25, 2020.
- [32] *VOLTRON™ documentation! — VOLTRON 7.0 Release Candidate documentation*. (visité le 25/09/2020).
- [33] M. GHORBANIAN, S. H. DOLATABADI, M. MASJEDI et P. SIANO, *Communication in smart grids : A comprehensive review on the existing and future communication and information infrastructures*, 2019. DOI : [10.1109/JSYST.2019.2928090](https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2928090).
- [34] B. MOHANDES, M. S. E. MOURSI, N. HATZIARGYRIOU et S. E. KHATIB, « A Review of Power System Flexibility With High Penetration of Renewables, » *IEEE Transactions on Power Systems*, t. 34, n° 4, p. 3140-3155, 2019. DOI : [10.1109/TPWRS.2019.2897727](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2897727).
- [35] B. CELIK, R. ROCHE, D. BOUQUAIN et A. MIRAOUI, « Decentralized Neighborhood Energy Management With Coordinated Smart Home Energy Sharing, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 9, n° 6, p. 6387-6397, 2018. DOI : [10.1109/TSG.2017.2710358](https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2710358). adresse : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7937821/>.

- [36] J. do PRADO, W. QIAO, L. QU et J. AGÜERO, « The Next-Generation Retail Electricity Market in the Context of Distributed Energy Resources : Vision and Integrating Framework, » *Energies*, t. 12, n° 3, p. 491, 2019. DOI : [10.3390/en12030491](https://doi.org/10.3390/en12030491).
adresse : <http://www.mdpi.com/1996-1073/12/3/491>.
- [37] *Energy |European Commission*. (visité le 09/10/2020).
- [38] J. WHITMORE et P.-O. PINEAU, « THE STATE OF ENERGY IN QUEBEC Chair in Energy Sector Management, HEC Montréal About HEC Montréal's Chair in Energy Sector Management, » rapp. tech., 2018.
- [39] HYDRO-QUÉBEC, « Hydro-Québec Sustainability Report 2018, » rapp. tech.
- [40] *Notre approche en développement durable | Hydro-Québec*. (visité le 06/05/2021).
- [41] *Using hot water | Hydro-Québec*. (visité le 05/05/2021).
- [42] P.-O. PINEAU, « L'électricité au Québec : Faire entrer le secteur dans le 21e siècle, » 2014.
- [43] HYDRO-QUÉBEC, « Rapport annuel 2010, » rapp. tech., 2010.
- [44] HYDRO-QUÉBEC, « Rapport annuel 2011, » rapp. tech., 2011.
- [45] HYDRO-QUÉBEC, « Rapport annuel 2012, » rapp. tech., 2012.
- [46] HYDRO-QUÉBEC, « Rapport annuel 2013, » rapp. tech., 2013.
- [47] HYDRO-QUÉBEC, « Rapport annuel 2014, » rapp. tech., 2014.
- [48] HYDRO-QUÉBEC, « Rapport annuel 2015, » rapp. tech., 2015.
- [49] HYDRO-QUÉBEC, « Rapport annuel 2016, » rapp. tech., 2016.
- [50] HYDRO-QUÉBEC, « Rapport annuel 2017, » rapp. tech., 2017.
- [51] HYDRO-QUÉBEC, « Rapport annuel 2018, » rapp. tech., 2018.
- [52] I. - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, « Market Report Series : Energy Efficiency 2018, » adresse : www.iea.org/t{\&}c/.
- [53] S. BOYD, N. PARIKH, E. CHU, B. PELEATO et J. ECKSTEIN, *Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers*, 2010. DOI : [10.1561/22000000016](https://doi.org/10.1561/22000000016).

- [54] B. CELIK, R. ROCHE, S. SURYANARAYANAN, D. BOUQUAIN et A. MIRAOUI, « Electric energy management in residential areas through coordination of multiple smart homes, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 80, n° April 2016, p. 260-275, 2017. DOI : [10.1016/j.rser.2017.05.118](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.118). adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.118>.
- [55] M. NAZARI-HERIS, M. A. MIRZAEI, B. MOHAMMADI-IVATLOO, M. MARZBAND et S. ASADI, « Economic-environmental effect of power to gas technology in coupled electricity and gas systems with price-responsive shiftable loads, » *Journal of Cleaner Production*, t. 244, p. 118 769, 2020. DOI : [10.1016/j.jclepro.2019.118769](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118769).
- [56] M. A. MIRZAEI, A. SADEGHI-YAZDANKHAH, B. MOHAMMADI-IVATLOO, M. MARZBAND, M. SHAFIE-KHAH et J. P. CATALÃO, « Integration of emerging resources in IGDT-based robust scheduling of combined power and natural gas systems considering flexible ramping products, » *Energy*, t. 189, p. 116 195, 2019. DOI : [10.1016/j.energy.2019.116195](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116195).
- [57] M. A. MIRZAEI, M. HEMMATI, K. ZARE et al., « A novel hybrid two-stage framework for flexible bidding strategy of reconfigurable micro-grid in day-ahead and real-time markets, » *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, t. 123, p. 106 293, 2020. DOI : [10.1016/j.ijepes.2020.106293](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106293).
- [58] M. A. MIRZAEI, M. NAZARI-HERIS, K. ZARE et al., « Evaluating the impact of multi-carrier energy storage systems in optimal operation of integrated electricity, gas and district heating networks, » *Applied Thermal Engineering*, t. 176, n° May, p. 115 413, 2020. DOI : [10.1016/j.applthermaleng.2020.115413](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115413). adresse : <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115413>.
- [59] F. SAFDARIAN, O. CIFTCI et A. KARGARIAN, « A Time Decomposition and Coordination Strategy for Power System Multi-Interval Operation, » *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, t. 2018-Augus, p. 1-5, 2018. DOI : [10.1109/PESGM.2018.8585766](https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8585766).

- [60] A. ENGELMANN, Y. JIANG, T. MUHLPFORDT, B. HOUSKA et T. FAULWASSER, « Toward distributed OPF using ALADIN, » *IEEE Transactions on Power Systems*, t. 34, n° 1, p. 584-594, 2019. DOI : [10.1109/TPWRS.2018.2867682](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2867682).
- [61] Z. TAN, P. YANG et A. NEHORAI, « An Optimal and Distributed Demand Response Strategy With Electric Vehicles in the Smart Grid, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 5, n° 2, p. 861-869, 2014. DOI : [10.1109/TSG.2013.2291330](https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2291330). adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/document/6728731/>.
- [62] N. GATSIIS et G. B. GIANNAKIS, « Residential load control : Distributed scheduling and convergence with lost AMI messages, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 3, n° 2, p. 770-786, 2012. DOI : [10.1109/TSG.2011.2176518](https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2176518).
- [63] M. BEAUDIN, H. ZAREIPOUR et A. SCHELLENBERG, « A Framework for Modelling Residential Prosumption Devices and Electricity Tariffs for Residential Demand Response, » p. 1-8, 2014. adresse : <http://www.ucalgary.ca/hzareipo/files/hzareipo/part1.pdf>.
- [64] A. H. MOHSENIAN-RAD et A. LEON-GARCIA, « Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 1, n° 2, p. 120-133, 2010. DOI : [10.1109/TSG.2010.2055903](https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2055903).
- [65] A. AGNETIS, G. DE PASCALE, P. DETTI et A. VICINO, « Load scheduling for household energy consumption optimization, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 4, n° 4, p. 2364-2373, 2013. DOI : [10.1109/TSG.2013.2254506](https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2254506).
- [66] A. ANVARI-MOGHADDAM, H. MONSEF et A. RAHIMI-KIAN, « Cost-effective and comfort-aware residential energy management under different pricing schemes and weather conditions, » *Energy and Buildings*, t. 86, p. 782-793, 2015. DOI : [10.1016/j.enbuild.2014.10.017](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.017).
- [67] A. ANVARI-MOGHADDAM, H. MONSEF et A. RAHIMI-KIAN, « Optimal smart home energy management considering energy saving and a comfortable lifestyle, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 6, n° 1, p. 324-332, 2015. DOI : [10.1109/TSG.2014.2349352](https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2349352).

- [68] S. SALINAS, M. LI et P. LI, « Multi-objective optimal energy consumption scheduling in smart grids, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 4, n° 1, p. 341-348, 2013. DOI : [10.1109/TSG.2012.2214068](https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2214068).
- [69] O. A. SIANAKI et M. A. MASOUM, « A multi-agent intelligent decision making support system for home energy management in smart grid : A fuzzy TOPSIS approach, » *Multiagent and Grid Systems*, t. 9, n° 3, p. 181-195, 2013. DOI : [10.3233/MGS-130205](https://doi.org/10.3233/MGS-130205). adresse : <https://www.medra.org/servlet/aliasResolver?alias=iospress&doi=10.3233/MGS-130205>.
- [70] M. C. BOZCHALUI, S. A. HASHMI, H. HASSEN, C. A. CAÑIZARES et K. BHATTACHARYA, « Optimal operation of residential energy hubs in smart grids, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 3, n° 4, p. 1755-1766, 2012. DOI : [10.1109/TSG.2012.2212032](https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2212032).
- [71] N. HASSAN, M. PASHA, C. YUEN, S. HUANG et X. WANG, « Impact of Scheduling Flexibility on Demand Profile Flatness and User Inconvenience in Residential Smart Grid System, » *Energies*, t. 6, n° 12, p. 6608-6635, 2013. DOI : [10.3390/en6126608](https://doi.org/10.3390/en6126608). adresse : <http://www.mdpi.com/1996-1073/6/12/6608>.
- [72] Z. A. KHAN, A. KHALID, N. JAVAID, A. HASEEB, T. SABA et M. SHAFIQ, « Exploiting Nature-Inspired-Based Artificial Intelligence Techniques for Coordinated Day-Ahead Scheduling to Efficiently Manage Energy in Smart Grid, » *IEEE Access*, t. 7, p. 140 102-140 125, 2019. DOI : [10.1109/ACCESS.2019.2942813](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2942813).
- [73] N. G. PATERAKIS, O. ERDINC, I. N. PAPPI, A. G. BAKIRTZIS et J. P. S. CATALAO, « Coordinated Operation of a Neighborhood of Smart Households Comprising Electric Vehicles, Energy Storage and Distributed Generation, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016. DOI : [10.1109/TSG.2015.2512501](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2512501).
- [74] M. MARZBAND, F. AZARINEJADIAN, M. SAVAGHEBI, E. POURESMAEIL, J. M. GUERRERO et G. LIGHTBODY, « Smart transactive energy framework in grid-connected multiple home microgrids under independent and coalition operations, » *Renewable Energy*, t. 126, p. 95-106, 2018. DOI : [10.1016/j.renene.2018.03.021](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.021).

- [75] A. ANVARI-MOGHADDAM, A. RAHIMI-KIAN, M. S. MIRIAN et J. M. GUERRERO, « A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and micro-grid system, » *Applied Energy*, t. 203, p. 41-56, 2017. DOI : [10.1016/j.apenergy.2017.06.007](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.007). adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.007>.
- [76] A. ANVARI-MOGHADDAM, J. M. GUERRERO, J. C. VASQUEZ, H. MONSEF et A. RAHIMI-KIAN, « Efficient energy management for a grid-tied residential microgrid, » *IET Generation, Transmission and Distribution*, t. 11, n° 11, p. 2752-2761, 2017. DOI : [10.1049/iet-gtd.2016.1129](https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1129). adresse : <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2016.1129>.
- [77] J. V. PAATERO et P. D. LUND, « A model for generating household electricity load profiles, » *International Journal of Energy Research*, t. 30, n° 5, p. 273-290, 2006. DOI : [10.1002/er.1136](https://doi.org/10.1002/er.1136). adresse : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/er.1136><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.1136><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.1136><http://doi.wiley.com/10.1002/er.1136>.
- [78] G. T. COSTANZO, G. ZHU, M. F. ANJOS et G. SAVARD, « A System Architecture for Autonomous Demand Side Load Management in Smart Buildings, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 3, n° 4, p. 2157-2165, 2012. DOI : [10.1109/TSG.2012.2217358](https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2217358). adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/document/6376273/>.
- [79] ZHI CHEN et LEI WU, « Residential Appliance DR Energy Management With Electric Privacy Protection by Online Stochastic Optimization, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 4, n° 4, p. 1861-1869, 2013. DOI : [10.1109/TSG.2013.2256803](https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2256803). adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/document/6522908/>.
- [80] P. SCOTT, S. THIÉBAUX, M. van den BRIEL et P. VAN HENTENRYCK, « Residential Demand Response under Uncertainty, » in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, t. 8124 LNCS, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, p. 645-660. DOI : [10.1007/978-3-642-40627-0_48](https://doi.org/10.1007/978-3-642-40627-0_48).

- [81] Z. CHEN, L. WU et Y. FU, « Real-Time Price-Based Demand Response Management for Residential Appliances via Stochastic Optimization and Robust Optimization, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 3, n° 4, p. 1822-1831, 2012. DOI : [10.1109/TSG.2012.2212729](https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2212729). adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/document/6311454/>.
- [82] Y. Y. HONG, J. K. LIN, C. P. WU et C. C. CHUANG, « Multi-objective air-conditioning control considering fuzzy parameters using immune clonal selection programming, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 3, n° 4, p. 1603-1610, 2012. DOI : [10.1109/TSG.2012.2210059](https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2210059).
- [83] J. L. MATHIEU, M. G. VAYA et G. ANDERSSON, « Uncertainty in the flexibility of aggregations of demand response resources, » in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2013, p. 8052-8057. DOI : [10.1109/IECON.2013.6700479](https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6700479).
- [84] T. T. KIM et H. V. POOR, « Scheduling power consumption with price uncertainty, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 2, n° 3, p. 519-527, 2011. DOI : [10.1109/TSG.2011.2159279](https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2159279).
- [85] A. H. MOHSENIAN-RAD, V. W. WONG, J. JATSKEVICH, R. SCHOBER et A. LEON-GARCIA, « Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 1, n° 3, p. 320-331, 2010. DOI : [10.1109/TSG.2010.2089069](https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2089069).
- [86] Z. YU, L. JIA, M. C. MURPHY-HOYE, A. PRATT et L. TONG, « Modeling and stochastic control for home energy management, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 4, n° 4, p. 2244-2255, 2013. DOI : [10.1109/TSG.2013.2279171](https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2279171).
- [87] X. CHEN, T. WEI et S. HU, « Uncertainty-aware household appliance scheduling considering dynamic electricity pricing in smart home, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 4, n° 2, p. 932-941, 2013. DOI : [10.1109/TSG.2012.2226065](https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2226065).
- [88] S. GHAEMI, J. SALEHI et F. H. AGHDAM, « Risk aversion energy management in the networked microgrids with presence of renewable generation using decentralised optimisation approach, » *IET Renewable Power Generation*, t. 13, n° 7, p. 1050-1061, 2019. DOI : [10.1049/iet-rpg.2018.5573](https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5573).

- [89] K. M. TSUI et S. C. CHAN, « Demand response optimization for smart home scheduling under real-time pricing, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 3, n° 4, p. 1812-1821, 2012. DOI : [10.1109/TSG.2012.2218835](https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2218835).
- [90] S. MOON et J.-W. LEE, « Multi-Residential Demand Response Scheduling With Multi-Class Appliances in Smart Grid, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 9, n° 4, p. 2518-2528, 2018. DOI : [10.1109/TSG.2016.2614546](https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2614546). adresse : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7579628/>.
- [91] B. WANG, Y. LI, W. MING et S. WANG, « Deep Reinforcement Learning Method for Demand Response Management of Interruptible Load, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 11, n° 4, p. 3146-3155, 2020. DOI : [10.1109/TSG.2020.2967430](https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2967430).
- [92] E. MATALANAS, M. CASTILLO-CAGIGAL, A. GUTIÉRREZ et al., « Neural network controller for Active Demand-Side Management with PV energy in the residential sector, » *Applied Energy*, t. 91, n° 1, p. 90-97, 2012. DOI : [10.1016/j.apenergy.2011.09.004](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.09.004).
- [93] X. GUAN, Z. XU et Q. S. JIA, « Energy-efficient buildings facilitated by microgrid, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 1, n° 3, p. 243-252, 2010. DOI : [10.1109/TSG.2010.2083705](https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2083705).
- [94] M. BEAUDIN, H. ZAREIPOUR, A. KIANI BEJESTANI et A. SCHELLENBERG, « Residential energy management using a two-horizon algorithm, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 5, n° 4, p. 1712-1723, 2014. DOI : [10.1109/TSG.2014.2310395](https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2310395).
- [95] M. A. A. PEDRASA, T. D. SPOONER et I. F. MACGILL, « Coordinated scheduling of residential distributed energy resources to optimize smart home energy services, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 1, n° 2, p. 134-143, 2010. DOI : [10.1109/TSG.2010.2053053](https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2053053).
- [96] U. DEPARTMENT OF ENERGY, « Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them, » Department of Energy, rapp. tech., 2005.

- [97] J. S. VARDAKAS, N. ZORBA et C. V. VERIKOUKIS, « A Survey on Demand Response Programs in Smart Grids : Pricing Methods and Optimization Algorithms, » *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, t. 17, n° 1, p. 152-178, 2015. DOI : [10.1109/COMST.2014.2341586](https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2341586). adresse : <https://ieeexplore.ieee.org/document/6861959/>.
- [98] H. SHAREEF, M. S. AHMED, A. MOHAMED et E. AL HASSAN, « Review on Home Energy Management System Considering Demand Responses, Smart Technologies, and Intelligent Controllers, » *IEEE Access*, t. 6, p. 24 498-24 509, 2018. DOI : [10.1109/ACCESS.2018.2831917](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2831917).
- [99] X. LU, K. ZHOU, X. ZHANG et S. YANG, « A systematic review of supply and demand side optimal load scheduling in a smart grid environment, » *Journal of Cleaner Production*, t. 203, p. 757-768, 2018. DOI : [10.1016/j.jclepro.2018.08.301](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.301).
- [100] H. T. HAIDER, O. H. SEE et W. ELMENREICH, *A review of residential demand response of smart grid*, 2016. DOI : [10.1016/j.rser.2016.01.016](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.016).
- [101] Y. WANG, S. WANG et L. WU, « Distributed optimization approaches for emerging power systems operation : A review, » *Electric Power Systems Research*, t. 144, p. 127-135, 2017. DOI : [10.1016/J.EPSR.2016.11.025](https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2016.11.025).
- [102] Z. ZHANG et M.-Y. CHOW, « Convergence Analysis of the Incremental Cost Consensus Algorithm Under Different Communication Network Topologies in a Smart Grid, » *IEEE Transactions on Power Systems*, t. 27, n° 4, p. 1761-1768, 2012. DOI : [10.1109/TPWRS.2012.2188912](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2188912).
- [103] B. V. SOLANKI, A. RAGHURAJAN, K. BHATTACHARYA et C. A. CANIZARES, « Including Smart Loads for Optimal Demand Response in Integrated Energy Management Systems for Isolated Microgrids, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 8, n° 4, p. 1739-1748, 2017. DOI : [10.1109/TSG.2015.2506152](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2506152).
- [104] T. M. HANSEN, R. ROCHE, S. SURYANARAYANAN, A. A. MACIEJEWSKI et H. J. SIEGEL, « Heuristic Optimization for an Aggregator-Based Resource Allocation in the Smart Grid, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 6, n° 4, p. 1785-1794, 2015. DOI : [10.1109/TSG.2015.2399359](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2399359).

- [105] A. OUAMMI, « Optimal Power Scheduling for a Cooperative Network of Smart Residential Buildings, » *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016. DOI : [10.1109/TSTE.2016.2525728](https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2525728).
- [106] C. VIVEKANANTHAN, Y. MISHRA, G. LEDWICH et F. LI, « Demand response for residential appliances via customer reward scheme, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 5, n° 2, p. 809-820, 2014. DOI : [10.1109/TSG.2014.2298514](https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2298514).
- [107] G. NIRO, D. SALLES, M. V. P. ALCÂNTARA et L. C. P. DA SILVA, « Large-scale control of domestic refrigerators for demand peak reduction in distribution systems, » *Electric Power Systems Research*, t. 100, p. 34-42, 2013. DOI : [10.1016/j.epsr.2013.03.002](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.03.002). adresse : <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2013.03.002>.
- [108] M. H. K. TUSHAR, C. ASSI, M. MAIER et M. F. UDDIN, « Smart microgrids : Optimal joint scheduling for electric vehicles and home appliances, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 5, n° 1, p. 239-250, 2014. DOI : [10.1109/TSG.2013.2290894](https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2290894).
- [109] J. MA, H. CHEN, L. SONG et Y. LI, « Residential Load Scheduling in Smart Grid : A Cost Efficiency Perspective, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, p. 1-1, 2015. DOI : [10.1109/TSG.2015.2419818](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2419818). adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7095598/>.
- [110] D. T. NGUYEN et L. B. LE, « Joint optimization of electric vehicle and home energy scheduling considering user comfort preference, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 5, n° 1, p. 188-199, 2014. DOI : [10.1109/TSG.2013.2274521](https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2274521).
- [111] R. DAI et M. MESBAHI, « Optimal power generation and load management for off-grid hybrid power systems with renewable sources via mixed-integer programming, » *Energy Conversion and Management*, 2013. DOI : [10.1016/j.enconman.2013.04.039](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.039).
- [112] M. KRANING, « Dynamic Network Energy Management via Proximal Message Passing, » rapp. tech. 2, 2014, p. 73-126. DOI : [10.1561/2400000002](https://doi.org/10.1561/2400000002).

- [113] R. DENG, Z. YANG, J. CHEN, N. R. ASR et M. Y. CHOW, « Residential energy consumption scheduling : A coupled-constraint game approach, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 5, n° 3, p. 1340-1350, 2014. DOI : [10.1109/TSG.2013.2287494](https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2287494).
- [114] D. K. MOLZAHN, F. DORFLER, H. SANDBERG et al., « A Survey of Distributed Optimization and Control Algorithms for Electric Power Systems, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 8, n° 6, p. 2941-2962, 2017. DOI : [10.1109/TSG.2017.2720471](https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2720471).
- [115] R HERMANS, M ALMASSALKHI et I HISKENS, « Incentive-based coordinated charging control of plug-in electric vehicles at the distribution-transformer level, » *2012 American Control Conference (ACC)*, p. 264-269, 2014. DOI : [10.1109/acc.2012.6315577](https://doi.org/10.1109/acc.2012.6315577).
- [116] Q. PENG et S. H. LOW, « Distributed optimal power flow algorithm for radial networks, I : Balanced single phase case, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 9, n° 1, p. 111-121, 2018. DOI : [10.1109/TSG.2016.2546305](https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2546305).
- [117] Y. WANG, L. WU et S. WANG, « A Fully-Decentralized Consensus-Based ADMM Approach for DC-OPF with Demand Response, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 8, n° 6, p. 2637-2647, 2017. DOI : [10.1109/TSG.2016.2532467](https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2532467).
- [118] S. BAHRAMI, Y. C. CHEN et V. W. S. WONG, « An Autonomous Demand Response Algorithm based on Online Convex Optimization, » *2018 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids, SmartGridComm 2018*, 2018. DOI : [10.1109/SmartGridComm.2018.8587535](https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2018.8587535).
- [119] M. MA, L. FAN et Z. MIAO, « Consensus ADMM and Proximal ADMM for economic dispatch and AC OPF with SOCP relaxation, » *NAPS 2016 - 48th North American Power Symposium, Proceedings*, n° 2, p. 1-6, 2016. DOI : [10.1109/NAPS.2016.7747961](https://doi.org/10.1109/NAPS.2016.7747961).
- [120] M. MEHRTASH, A. KARGARIAN et A. MOHAMMADI, « Distributed optimisation-based collaborative security-constrained transmission expansion planning for multi-regional systems, » *IET Generation, Transmission and Distribution*, t. 13, n° 13, p. 2819-2827, 2019. DOI : [10.1049/iet-gtd.2018.6555](https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6555).

- [121] B. KIM et R BALDICK, « A comparison of distributed optimal power flow algorithms, » *IEEE Transactions on Power Systems*, t. 15, n° 2, p. 599-604, 2000. DOI : [10.1109/59.867147](https://doi.org/10.1109/59.867147).
- [122] S. CHAKRABARTI, M. KRANING, E. CHU, R. BALDICK et S. BOYD, « Security Constrained Optimal Power Flow via proximal message passing, » *2014 Clemson University Power Systems Conference, PSC 2014*, 2014. DOI : [10.1109/PSC.2014.6808131](https://doi.org/10.1109/PSC.2014.6808131).
- [123] Y. YANG, Z. QIN, B. LIU, H. LIU, Y. HOU et H. WEI, « Parallel solution of transient stability constrained optimal power flow by exact optimality condition decomposition, » *IET Generation, Transmission and Distribution*, t. 12, n° 21, p. 5858-5866, 2018. DOI : [10.1049/iet-gtd.2018.5151](https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.5151).
- [124] W. DENG, M.-J. LAI, Z. PENG et W. YIN, « Parallel Multi-Block ADMM with $o(1/k)$ Convergence, » *Journal of Scientific Computing*, t. 71, n° 2, p. 712-736, 2017. DOI : [10.1007/s10915-016-0318-2](https://doi.org/10.1007/s10915-016-0318-2).
- [125] R. CARLI et M. DOTOLI, « Distributed Alternating Direction Method of Multipliers for Linearly Constrained Optimization over a Network, » *IEEE Control Systems Letters*, t. 4, n° 1, p. 247-252, 2020. DOI : [10.1109/LCSYS.2019.2923078](https://doi.org/10.1109/LCSYS.2019.2923078).
- [126] B. HOUSKA, J. FRASCH et M. DIEHL, « An augmented Lagrangian based algorithm for distributed nonconvex optimization, » *SIAM Journal on Optimization*, t. 26, n° 2, p. 1101-1127, 2016. DOI : [10.1137/140975991](https://doi.org/10.1137/140975991).
- [127] N. MEYER-HUEBNER, M. SURIYAH et T. LEIBFRIED, « Distributed Optimal Power Flow in Hybrid AC-DC Grids, » *IEEE Transactions on Power Systems*, t. 34, n° 4, p. 2937-2946, 2019. DOI : [10.1109/TPWRS.2019.2892240](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2892240).
- [128] A. KARGARIAN, M. MEHRTASH et B. FALAHATI, « Decentralized Implementation of Unit Commitment with Analytical Target Cascading : A Parallel Approach, » *IEEE Transactions on Power Systems*, t. 33, n° 4, p. 3981-3993, 2018. DOI : [10.1109/TPWRS.2017.2787645](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2787645).

- [129] A. MOHAMMADI, M. MEHRTASH et A. KARGARIAN, « Diagonal quadratic approximation for decentralized collaborative TSO+DSO optimal power flow, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 10, n° 3, p. 2358-2370, 2019. DOI : [10.1109/TSG.2018.2796034](https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2796034).
- [130] K. BAKER, J. GUO, G. HUG et X. LI, « Distributed MPC for Efficient Coordination of Storage and Renewable Energy Sources Across Control Areas, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 7, n° 2, p. 992-1001, 2016. DOI : [10.1109/TSG.2015.2512503](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2512503).
- [131] N. F. AVILA et C. C. CHU, « Distributed Probabilistic ATC Assessment by Optimality Conditions Decomposition and LHS Considering Intermittent Wind Power Generation, » *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, t. 10, n° 1, p. 375-385, 2019. DOI : [10.1109/TSTE.2018.2796102](https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2796102).
- [132] A. AHMADI-KHATIR, A. J. CONEJO et R. CHERKAOUI, « Multi-area unit scheduling and reserve allocation under wind power uncertainty, » *IEEE Transactions on Power Systems*, t. 29, n° 4, p. 1701-1710, 2014. DOI : [10.1109/TPWRS.2013.2293542](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2293542).
- [133] G. HUG, S. KAR et C. WU, « Consensus + Innovations Approach for Distributed Multiagent Coordination in a Microgrid, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 6, n° 4, p. 1893-1903, 2015. DOI : [10.1109/TSG.2015.2409053](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2409053).
- [134] M. KRANING, E. CHU, J. LAVAEI et S. BOYD, « Message Passing for Dynamic Network Energy Management, » *Foundations and Trends®in Optimization*, t. 1, n° 2, p. 70-122, 2012. arXiv : [1204.1106](https://arxiv.org/abs/1204.1106). adresse : <http://arxiv.org/abs/1204.1106>.
- [135] H.-h. CHANG, K.-l. LIAN, Y.-c. SU et W.-j. LEE, « Power-Spectrum-Based Wavelet Transform for Nonintrusive Demand Monitoring and Load Identification, » *IEEE Transactions on Industry Applications*, t. 50, n° 3, p. 2081-2089, mai 2014. DOI : [10.1109/TIA.2013.2283318](https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2283318). adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6607153>.
- [136] A. KARGARIAN, J. MOHAMMADI, J. GUO et al., « Toward Distributed/Decentralized DC Optimal Power Flow Implementation in Future Electric Power Systems, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 9, n° 4, p. 2574-2594, 2018. DOI : [10.1109/TSG.2016.2614904](https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2614904).

- [137] M. H. K. TUSHAR, C. ASSI, M. MAIER et M. F. UDDIN, « Smart microgrids : Optimal joint scheduling for electric vehicles and home appliances, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 5, n° 1, p. 239-250, 2014. DOI : [10.1109/TSG.2013.2290894](https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2290894).
- [138] C. O. ADIKA et L. WANG, « Non-cooperative decentralized charging of homogeneous households' batteries in a smart grid, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 5, n° 4, p. 1855-1863, 2014. DOI : [10.1109/TSG.2014.2302449](https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2302449).
- [139] D. MAK et D. H. CHOI, « Optimization framework for coordinated operation of home energy management system and Volt-VAR optimization in unbalanced active distribution networks considering uncertainties, » *Applied Energy*, t. 276, p. 115 495, 2020. DOI : [10.1016/j.apenergy.2020.115495](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115495).
- [140] F. ETEDADI, K. AGBOSSOU, N. HENAO, S. KELOUWANI et F. LAURENCELLE, « Distributed Residential Demand Response Using Building Mass and Electric Thermal Storage System, » in *2022 IEEE 10th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, Oshawa, Canada : IEEE, 2022, p. 19-25. DOI : [10.1109/SEGE55279.2022.9889758](https://doi.org/10.1109/SEGE55279.2022.9889758).
- [141] N. LIU, X. YU, C. WANG et J. WANG, « Energy Sharing Management for Microgrids with PV Prosumers : A Stackelberg Game Approach, » *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, t. 13, n° 3, p. 1088-1098, 2017. DOI : [10.1109/TII.2017.2654302](https://doi.org/10.1109/TII.2017.2654302).
- [142] L. JIA et L. TONG, « Dynamic Pricing and Distributed Energy Management for Demand Response, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 7, n° 2, p. 1128-1136, 2016. DOI : [10.1109/TSG.2016.2515641](https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2515641). arXiv : [1601.02319](https://arxiv.org/abs/1601.02319).
- [143] M. D. DE SOUZA DUTRA et N. ALGUACIL, « Optimal residential users coordination via demand response : An exact distributed framework, » *Applied Energy*, t. 279, p. 115 851, 2020. DOI : [10.1016/J.APENERGY.2020.115851](https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.115851).
- [144] J. ZHANG, L. CHE, X. WAN et M. SHAHIDEHPOUR, « Distributed Hierarchical Coordination of Networked Charging Stations Based on Peer-to-Peer Trading and EV Charging Flexibility Quantification, » *IEEE Transactions on Power Systems*, t. 37, n° 4, p. 2961-2975, 2022. DOI : [10.1109/TPWRS.2021.3123351](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3123351).

- [145] Z. ZHANG, R. DENG, T. YUAN et S. JOE QIN, « Bi-level Demand Response Game with Information Sharing among Consumers, » *IFAC-PapersOnLine*, t. 49, n° 7, p. 663-668, 2016. DOI : [10.1016/j.ifacol.2016.07.252](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.252). adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896316304591>.
- [146] N. ZHANG, Y. YAN et W. SU, « A game-theoretic economic operation of residential distribution system with high participation of distributed electricity prosumers, » *Applied Energy*, t. 154, p. 471-479, 2015. DOI : [10.1016/J.APENERGY.2015.05.011](https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.05.011). adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915006212>.
- [147] M. JUELGAARD, P. ANDERSEN et R. WISNIEWSKI, « Distribution loss reduction by household consumption coordination in smart grids, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 5, n° 4, p. 2133-2144, 2014. DOI : [10.1109/TSG.2014.2312428](https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2312428).
- [148] G. TSAOUSOGLU, K. STEROTIS, N. EFTHYMIPOULOS, P. MAKRIS et E. VARVARIGOS, « Truthful, Practical and Privacy-Aware Demand Response in the Smart Grid via a Distributed and Optimal Mechanism, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 11, n° 4, p. 3119-3130, 2020. DOI : [10.1109/TSG.2020.2965221](https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2965221). adresse : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8954657/>.
- [149] S. OLESI MUHANJI, S. V. GOLDING, T. MONTGOMERY, C. BELOW et A. M. FARID, « A Distributed Economic Model Predictive Control Design for a Transactive Energy Market Platform in Lebanon, NH, » rapp. tech., 7 Dec 2020. arXiv : [2012.04058v1](https://arxiv.org/abs/2012.04058v1).
- [150] L. HAN, T. MORSTYN et M. MCCULLOCH, « Incentivizing Prosumer Coalitions With Energy Management Using Cooperative Game Theory, » *IEEE Transactions on Power Systems*, t. 34, n° 1, p. 303-313, 2019. DOI : [10.1109/TPWRS.2018.2858540](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2858540). adresse : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8417894/>.
- [151] S. A. MANSOURI, A. REZAAE JORDEHI, M. MARZBAND, M. TOSTADO-VÉLIZ, F. JURADO et J. A. AGUADO, « An IoT-enabled hierarchical decentralized framework for multi-energy microgrids market management in the presence of smart prosumers using a deep learning-based forecaster, » *Applied Energy*, t. 333, p. 120 560, 2023. DOI : [10.1016/J.APENERGY.2022.120560](https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.120560).

- [152] T. RUI, G. LI, Q. WANG, C. HU, W. SHEN et B. XU, « Hierarchical Optimization Method for Energy Scheduling of Multiple Microgrids, » *Applied Sciences* 2019, Vol. 9, Page 624, t. 9, n° 4, p. 624, 2019. DOI : [10.3390/APP9040624](https://doi.org/10.3390/APP9040624). adresse : <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/4/624/html><https://www.mdpi.com/2076-3417/9/4/624>.
- [153] J. LEE, J. GUO, J. K. CHOI et M. ZUKERMAN, « Distributed energy trading in microgrids : A game-theoretic model and its equilibrium analysis, » *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, t. 62, n° 6, p. 3524-3533, 2015. DOI : [10.1109/TIE.2014.2387340](https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2387340).
- [154] A. MONDAL, S. MISRA et M. S. OBAIDAT, « Distributed home energy management system with storage in smart grid using game theory, » *IEEE Systems Journal*, t. 11, n° 3, p. 1857-1866, 2017. DOI : [10.1109/JSYST.2015.2421941](https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2421941).
- [155] S. MAHARJAN, Q. ZHU, Y. ZHANG, S. GJESSING et T. BAŞAR, « Demand response management in the smart grid in a large population regime, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 7, n° 1, p. 189-199, 2016. DOI : [10.1109/TSG.2015.2431324](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2431324).
- [156] K. ANOH, S. MAHARJAN, A. IKPEHAI, Y. ZHANG et B. ADEBISI, « Energy Peer-to-Peer Trading in Virtual Microgrids in Smart Grids : A Game-Theoretic Approach, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 11, n° 2, p. 1264-1275, 2020. DOI : [10.1109/TSG.2019.2934830](https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2934830).
- [157] Y. LIU, L. GUO et C. WANG, « A robust operation-based scheduling optimization for smart distribution networks with multi-microgrids, » *Applied Energy*, t. 228, p. 130-140, 2018. DOI : [10.1016/J.APENERGY.2018.04.087](https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.04.087).
- [158] Y. FU, Z. ZHANG, Z. LI et Y. MI, « Energy Management for Hybrid AC/DC Distribution System with Microgrid Clusters Using Non-Cooperative Game Theory and Robust Optimization, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 11, n° 2, p. 1510-1525, 2020. DOI : [10.1109/TSG.2019.2939586](https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2939586).
- [159] X. DONG, X. LI et S. CHENG, « Energy management optimization of microgrid cluster based on multi-agent-system and hierarchical stackelberg game theory, » *IEEE Access*, t. 8, p. 206 183-206 197, 2020. DOI : [10.1109/ACCESS.2020.3037676](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037676).

- [160] H. GAO, S. XU, Y. LIU, L. WANG, Y. XIANG et J. LIU, « Decentralized optimal operation model for cooperative microgrids considering renewable energy uncertainties, » *Applied Energy*, t. 262, p. 114 579, 2020. DOI : [10.1016/J.APENERGY.2020.114579](https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.114579).
- [161] A. NAWAZ, J. WU, J. YE, Y. DONG et C. LONG, « Distributed MPC-based energy scheduling for islanded multi-microgrid considering battery degradation and cyclic life deterioration, » *Applied Energy*, t. 329, p. 120 168, 2023. DOI : [10.1016/J.APENERGY.2022.120168](https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.120168).
- [162] R. ZHANG, X. LI, L. FU, T. JIANG, G. LI et H. CHEN, « Network-aware energy management for microgrids in distribution market : A leader-followers approach, » 2023. DOI : [10.1016/j.apenergy.2022.120522](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120522). adresse : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120522>.
- [163] Z. LI, L. WU, Y. XU, L. WANG et N. YANG, « Distributed tri-layer risk-averse stochastic game approach for energy trading among multi-energy microgrids, » *Applied Energy*, t. 331, p. 120 282, 2023. DOI : [10.1016/J.APENERGY.2022.120282](https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.120282).
- [164] S. PARHIZI, A. KHODAEI et M. SHAHIDEHPOUR, « Market-based versus price-based microgrid optimal scheduling, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 9, n° 2, p. 615-623, 2018. DOI : [10.1109/TSG.2016.2558517](https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2558517).
- [165] F. ETEDADI, S. KELOUWANI, K. AGBOSSOU, N. HENAO et F. LAURENCELLE, « Consensus and sharing based distributed coordination of home energy management systems with demand response enabled baseboard heaters, » *Applied Energy*, t. 336, p. 120 833, 2023. DOI : [10.1016/j.apenergy.2023.120833](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120833). adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261923001976>.
- [166] N. ZHANG, Y. YAN et W. SU, « A game-theoretic economic operation of residential distribution system with high participation of distributed electricity prosumers, » *Applied Energy*, t. 154, p. 471-479, 2015. DOI : [10.1016/j.apenergy.2015.05.011](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.011).
- [167] N. HENAO, M. FOURNIER, S. KELOUWANI et T. DE, « Characterizing Smart Thermostats Operation in Residential Zoned Heating Systems and its Impact on Energy Saving Metrics of Electrical and Computer Engineering of Universit ´ e du Qu ´ ebec

- a ebec , Canada Institut de Recherche d ' Hydro-Qu ´ ebec , Canada, » in *Proceedings of eSim 2018, the 10th conference of IBPSA-Canada*, Montreal, QC, Canada, 2018.
- [168] L. S. SHAPLEY, *Notes on the n-Person Game – II : The Value of an n-Person Game*, "Accessed : 2021-06-29", 1951.
- [169] F. ETEDADI, S. KELOUWANI, K. AGBOSSOU, N. HENAO et F. LAURENCELLE, « Consensus and sharing based distributed coordination of home energy management systems with demand response enabled baseboard heaters, » *Applied Energy*, t. 336, p. 120 833, 2023. DOI : [10.1016/j.apenergy.2023.120833](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120833). adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261923001976>.
- [170] *Rate D | Hydro-Québec*, "Accessed : 2022-01-02", 2022.
- [171] S. BOYD, N. PARIKH, E. CHU, B. PELEATO et J. ECKSTEIN, « Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers, » *Foundations and Trends in Machine Learning*, t. 3, n° 1, p. 1-122, 2010. DOI : [10.1561/22000000016](https://doi.org/10.1561/22000000016).