



Titre: Gestion de stockage d'énergie thermique d'un arc de chauffe-eaux
par une commande à champ moyen

Auteur: Benoît Bourdel
Author:

Date: 2016

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Bourdel, B. (2016). Gestion de stockage d'énergie thermique d'un arc de chauffe-eaux par une commande à champ moyen [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2131/>
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2131/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Frédéric Sirois, & Roland P. Malhamé
Advisors:

Programme: génie énergétique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

GESTION DU STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE D'UN PARC DE
CHAUFFE-EAUX PAR UNE COMMANDE À CHAMP MOYEN

BENOÎT BOURDEL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉNERGÉTIQUE)
AVRIL 2016

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

GESTION DU STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE D'UN PARC DE
CHAUFFE-EAUX PAR UNE COMMANDE À CHAMP MOYEN

présenté par : BOURDEL Benoît

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Mme SANSÒ Brunilde, Ph. D., présidente

M. SIROIS Frédéric, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. MALHAMÉ Roland P., Ph. D , membre et codirecteur de recherche

M. BERNIER Michel, Ph. D., membre

DÉDICACE

“Une panne d’électricité laisse l’aveugle indifférent.”

Grégoire Lacroix

L’énergie est notre avenir, économisons-la !

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur M. Frédéric Sirois et mon co-directeur M. Roland Malhamé pour leurs conseils, soutien et vision tout au long de ce projet. Un grand merci à David Beauvais pour les rencontres constructives que nous avons eues ensemble, de même que pour l'aide apportée tout au long du projet et pour le partage de sa vision entrepreneuriale. Merci aussi à la Coop St-Jean-Baptiste pour l'aide essentielle qu'elle a apportée en nous fournissant leurs données SCADA. Merci aussi à Christophe Sibuet de WPred pour ses précieux conseils.

J'ai une pensée aussi pour toute l'équipe smartDESC, avec qui j'ai travaillé dans une ambiance chaleureuse, dynamique et amicale. Merci aussi à Cyril, Joseph, Alice, Guigui, Zaza, Marine, Coco, Juliette, Emmanuel et toute la gang de Montréal pour avoir rendu ma maîtrise au Québec si inoubliable

RÉSUMÉ

Dans un contexte actuel de transition énergétique, le *smartgrid* et la gestion de la charge électrique sont des champs de recherche de plus en plus actifs. Le projet smartDESC dans lequel ce mémoire s'inscrit, s'intéresse plus spécifiquement au contrôle d'appareils électroménagers chauffant (chauffe-eau, chauffe-espace) permettant de moduler la charge domestique.

Ainsi, en utilisant la théorie des jeux à champ moyen, le projet smartDESC veut convertir les chauffe-eaux (et éventuellement les chauffe-espace) en des réservoirs d'énergie intelligents. Pour ce faire, un ensemble de "modules" a été développé. Certains permettent la génération d'une commande optimale et son interprétation en champ moyen, d'autres permettent la simulation numérique d'un chauffe-eau, du processus aléatoire de tirage d'eau ou d'un réseau de télécommunications.

Durant la maîtrise de recherche, tous ces modules ont été intégrés, testés, interfacés et réglés dans un simulateur commun. Ce simulateur a pour but de réaliser des simulations de réseau électriques complètes allant du fonctionnement individuel de chaque chauffe-eau jusqu'à des considérations plus générales tel que la charge globale électrique. Après l'interfaçage de l'ensemble des modules, un ensemble de simulations ont été réalisées. Ces simulations permettent d'analyser la réponse d'un parc de chauffe-eaux connectés à différents types de contrôle et de situation.

Dans un premier temps, les différents modules sont décrits précisément d'un point de vue théorique et pratique. Ensuite, différents types de contrôle sont appliqués à une population uniforme de maisons équipées de chauffe-eaux et de dispositifs de commande. Les résultats de chacun de ces contrôles sont analysés et comparés afin d'en comprendre les points forts et faibles. Enfin, une étude est menée afin d'analyser les capacités de résilience d'un contrôle champ-moyen.

Ce rapport tend à montrer la possibilité d'effectuer un contrôle basé sur l'utilisation de la théorie des jeux à champ moyen. Ce contrôle offre une bonne résilience aux imprévus pouvant perturber le réseau. Il est aussi démontré que l'utilisation d'un contrôle champs-moyen pour absorber les variations dues à la production éolienne est possible. Ainsi, en réduisant la variabilité de la charge électrique du secteur résidentiel, le contrôle en champ moyen participe à accroître la stabilité générale du réseau.

La prochaine étape du projet smartDESC est maintenant la mise en place d'un premier prototype de chauffe-eau en cours de réalisation depuis mars 2016 à l'École Polytechnique de

Montréal. Ce prototype a pour but de confirmer physiquement l'ensemble des thèses introduit dans le cadre du projet.

ABSTRACT

In today's energy transition, smart grids and electrical load control are very active research fields. This master's thesis is an offshoot of the SmartDesc project which aims at using energy storage capability of electric household appliances, such as water heaters and electric heaters to mitigate the fluctuations of system loads and renewable generation.

The smartDESC project aims at demonstrating that the mean field game theory (MFG), as new mathematical theory, can be used to convert and control water heaters (and possibly space heater) into smart thermal capacities. Thus, a set of "modules" has been developed. These modules are used to generate the optimal control and locally interpret it, to simulate the water-heater thermophysics or water draw event, or to virtualize a telecommunication mesh network. The different aspects of the project have been first studied and developed separately.

During the course of this master's research, the modules have been integrated, tested, interfaced and tuned in a common simulator. This simulator is designed to make complete electrical network simulations with a multi-scale approach (from individual water heater to global electric load and production).

Firstly, the modules are precisely described theoretically and practically. Then, different types of control are applied to an uniform population of houses fitted with water heaters and controllers. The results of these controls are analysed and compared in order to understand their strengths and weaknesses. Finally, a study was conducted to analyse the resilience of a mean field control.

This report demonstrates that mean field game theory in coordination with a system level aggregate model based optimization program, is able to effectively control a large population of water heaters to smooth the overall electrical load. This control offers good resilience to unforeseen circumstances that can disrupt the network.

It is also demonstrated that a mean field control is able to absorb fluctuations due to wind power production. Thus, by reducing the variability of the residential sector's electrical charge, the mean field control plays a role in increasing power system stability in the face of high levels of renewable energy penetration.

The next stage of smartDESC project is now to set up an intelligent electric water heater prototype. This prototype, in progress since January 2016 at École Polytechnique in Montreal, is aimed at proving concretely the theories developed in the project.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xv
LISTE DES ANNEXES	xvi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Définitions et concepts de base	1
1.1.1 Le projet smartDESC	2
1.1.2 Place de ce mémoire dans le projet smartDESC	3
1.2 Éléments de la problématique	4
1.2.1 Consommation d'électricité domestique	4
1.2.2 Avantages économiques	5
1.2.3 Avantages écologiques	7
1.3 Objectifs de recherche	7
1.4 Plan du mémoire	8
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	9
CHAPITRE 3 PRÉSENTATIONS DES CONCEPTS ET MODULES DU PROJET SMARTDESC	12
3.1 Le réseau électrique	12
3.1.1 Principes théoriques	12
3.1.2 Aspects pratiques	13

3.2	Le chauffe-eau	13
3.2.1	Principes théoriques	13
3.2.2	Aspects pratiques	14
3.3	L'optimisation de la charge électrique du réseau	16
3.3.1	Principes théoriques	16
3.3.2	Aspects pratiques	18
3.4	Le contrôle en champ moyen.	18
3.4.1	Principes théoriques	18
3.4.2	Aspects pratiques	20
3.5	Le réseau de télécommunications	21
3.5.1	Principes théoriques	21
3.5.2	Aspects pratiques	22
3.6	Profils d'optimisation de la charge	23
3.6.1	Optimisation en moyenne glissante	24
3.6.2	Minimisation de la variation de puissance	25
3.7	Simulateur et interactions entre les différents modules	27
CHAPITRE 4 TYPES DE CONTRÔLE ET CONFRONTATION DES RÉSULTATS		30
4.1	Contrôleur thermostatique classique	30
4.1.1	Désagrégation de la charge	30
4.1.2	Première étude et vérification du simulateur	32
4.2	Délestage par zone	33
4.2.1	Délestage à 1 groupe	33
4.2.2	Délestage à N groupes	36
4.3	Commande en modulation de puissance	40
4.3.1	Sans ajustement thermique	40
4.3.2	Avec ajustement thermique	43
4.3.3	Avec ajustement thermique d'urgence	45
4.4	Contrôle en champ moyen	47
4.4.1	Avec une optimisation déterministe	47
4.4.2	Étude de la distribution thermique : équité entre les chauffe-eaux . .	51
4.4.3	Impact sur le réseau de télécommunications	54
4.4.4	Impact de la fréquence de mise à jour du champ-moyen	55
4.5	Tableau récapitulatif sur les différents types de contrôles	59
CHAPITRE 5 ÉTUDE DE RÉSILIENCE FACE AUX PERTURBATIONS		60
5.1	Dans le cadre d'une coupure de courant généralisée : black-out	60

5.2	Absorption des énergies renouvelables non-contrôlables	62
5.2.1	Optimisation stochastique	63
5.2.2	Étude de résiliences aux perturbations	72
CHAPITRE 6	CONCLUSION	75
6.1	Synthèse des travaux	75
6.2	Limitations de la solution proposée et améliorations futures	76
RÉFÉRENCES	77
ANNEXES	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Structure du Tarif D. (<i>Source : Hydro Québec 2016</i>)	6
Tableau 4.1	Facteur d'ajustement de la puissance en fonction de la température. .	44
Tableau 4.2	Résultats du réseau de télécommunications pour une simulation en champ moyen de 400 maisons sur un maillage à 3300 noeuds avec mise à jour horaire de la commande.	54
Tableau 4.3	Tableau récapitulatif sur les différents types de contrôles.	59
Tableau 5.1	Scénario de production éolienne en fonction de l'heure de simulation (sur 3 jours)	72

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Secteurs de consommation d'énergie finale en France (<i>Source : SOeS (Service de l'Observation et des Statistiques)</i>).	4
Figure 1.2	Répartition de la consommation énergétique résidentielle au Canada (<i>Source : Anne-Marie Riopel, UQÀM (voir Ressources naturelles Canada, 2016)</i>).	5
Figure 1.3	Prix SPOT de l'électricité sur le marché français, le 1 ^{er} février 2016. (<i>Source : EPEX SPOT SE</i>)	6
Figure 3.1	Schéma de la modélisation d'un chauffe-eau	15
Figure 3.2	État d'énergie d'un chauffe-eau de 60 gallons en fonction de sa température interne moyenne et de la température d'eau froide.	16
Figure 3.3	Représentation en schéma-bloc de l'algorithme d'optimisation de la charge	18
Figure 3.4	Représentation en schéma-bloc de l'algorithme de contrôle en champ moyen.	21
Figure 3.5	Représentation schématique des deux niveaux de simulation	23
Figure 3.6	Consommation moyenne par maison issue de données SCADA réelles.	24
Figure 3.7	Profil optimisé de la charge généré avec une moyenne glissante sur 12 heures.	25
Figure 3.8	Profil d'optimisation en minimisant la variation de puissance.	27
Figure 3.9	Schéma global du simulateur en fonctionnement champ moyen avec optimisateur stochastique : (agrandi en annexe A)	28
Figure 4.1	Courbe de consommation moyenne d'un chauffe-eau au cours d'une journée.	31
Figure 4.2	Simulation de 400 maisons avec contrôleur thermostatique : courbes de charge contrôlable, non-contrôlable et totale.	32
Figure 4.3	Simulation de délestage à 1 groupe entre 19h et 22h	34
Figure 4.4	Évolution de la proportion de contrôleur thermostatique actif pendant un délestage entre 19h et 22h	35
Figure 4.5	Résultat d'une optimisation par délestage à 5 groupes	38
Figure 4.6	Simulation avec contrôle par délestage à 10 groupes sur une population de 100 maisons.	38
Figure 4.7	Simulation avec contrôle par délestage à 50 groupes sur une population de 500 maisons.	39

Figure 4.8	Simulation avec contrôle par délestage à 200 groupes sur une population de 4000 maisons.	39
Figure 4.9	Simulation avec contrôle par limitation de puissance simple sur 500 maisons.	41
Figure 4.10	Distribution thermique de la population avec contrôle par limitation de puissance simple sur 500 maisons.	43
Figure 4.11	Simulation avec contrôle par limitation de puissance avec redistribution sur 500 maisons.	45
Figure 4.12	Distribution thermique de la population avec contrôle par limitation de puissance avec redistribution sur 500 maisons.	46
Figure 4.13	Simulation avec contrôle par limitation de puissance avec redistribution et état critique sur 4000 maisons.	47
Figure 4.14	Évolution de la température moyenne de la population avec un contrôle champ moyen sur 400 maisons.	48
Figure 4.15	Évolution de la charge (puissance) moyenne de la population avec un contrôle champ moyen sur 400 maisons.	50
Figure 4.16	Simulation d'un contrôle déterministe en champ moyen sur un parc de 400 maisons.	51
Figure 4.17	Distribution thermique d'un parc de 400 chauffe-eaux avec un contrôle déterministe en champ moyen.	52
Figure 4.18	Parcours individuels de 3 chauffe-eaux durant une simulation avec contrôle en champ moyen.	53
Figure 4.19	Essaim d'étourneaux (<i>Source : inconnue</i>)	53
Figure 4.20	Différence entre un rafraîchissement horaire ou journalier pour une commande identique.	56
Figure 4.21	Augmentation de l'erreur commande/réalisation par rapport à une actualisation horaire.	56
Figure 4.22	Écart maximal d'estimation de la température moyenne en fonction du taux d'émission pour 50 000 maisons pendant 10 jours	58
Figure 4.23	Écarts d'estimation de la température moyenne en fonction du nombre de maisons avec 4 émissions par jour pendant 10 jours	58
Figure 5.1	Réaction face à une coupure de courant (19h10 - 20h30) pour un parc thermostatique et un parc champ moyen.	61
Figure 5.2	Éoliennes sur ciel bleu (<i>Source : Google Image</i>)	63
Figure 5.3	Chaîne de génération des prévisions de consommation et de production.	63

Figure 5.4	Scénarios (22) de prévision de consommation pour la journée du 2 septembre 2016 en banlieue de Montréal.	65
Figure 5.5	Scénarios (22) de prévision de production éolienne pour la journée du 2 septembre 2016 en banlieue de Montréal.	65
Figure 5.6	Scénarios de charge et de production retenus pour la simulation. . . .	67
Figure 5.7	Résultats pour une simulation stochastique sur 3 jours pour 600 maisons avec 10% de puissance éolienne.	68
Figure 5.8	Comparaison entre le contrôle champ moyen et thermostatique pour un parc de 600 maisons avec production éolienne avec 10% de puissance éolienne.	69
Figure 5.9	Scénarios de charge et de production pour une puissance installée éolien à 20%.	71
Figure 5.10	Comparaison entre le contrôle champ moyen et thermostatique pour un parc de 600 maisons avec production éolienne avec 20% de puissance éolienne.	71
Figure 5.11	Les deux scénarios de production éolienne avec rupture à 12h du jour 2.	72
Figure 5.12	Résultats d'optimisation en version déterministe, stochastique et thermostatique (sans contrôle) dans une simulation à changement de scénarios.	73

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CM	Champ moyen
EnR	Énergie renouvelable

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	SCHÉMA GLOBAL DU SIMULATEUR EN FONCTIONNEMENT CHAMP MOYEN AVEC OPTIMISATEUR STOCHASTIQUE . . .	81
----------	---	----

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Suite aux rapports du GIEC (Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat), la transition énergétique est devenue un objectif prioritaire mondial. Les montants nécessaires pour cette transition s’évaluent à plusieurs milliers de milliards de dollars d’ici 2050 (voir ANCRE, 2013).

La transition énergétique s’exerce à travers un grand nombre de domaines et d’applications. Entre autres, le *smart grid* veut changer notre manière de concevoir un réseau d’électricité et notre manière de consommer l’électricité. En s’appuyant sur les nouvelles technologies numériques et de l’information, le smart grid redéfinit le réseau électrique de demain en le voulant plus intelligent, distribué, stable et écologique.

Bien entendu, l’horizon de temps est assez lointain et les processus qui régissent l’évolution d’un réseau énergétique se déroulent sur plusieurs décennies. Mais prendre en compte dès aujourd’hui ces changements à venir dans la recherche universitaire est la meilleure assurance d’être prêt quand cela arrivera. De nombreuses expérimentations locales à petite échelle fleurissent d’ores et déjà à travers le monde. Précurseurs d’un nouveau modèle énergétique à venir, elles sont de véritables laboratoires d’innovation.

Comment penser ce modèle en rupture et quelles sont les mécaniques techniques, mathématiques et informatiques, qui doivent le gouverner et le mouvoir ?

1.1 Définitions et concepts de base

Le *smart grid* est « un réseau de distribution d’électricité « intelligent » qui utilise des technologies informatiques de manière à optimiser la production, la distribution, la consommation d’énergie et qui a pour objectif d’optimiser l’ensemble des mailles du réseau d’électricité qui va de tous les producteurs à tous les consommateurs afin d’améliorer l’efficacité énergétique de l’ensemble » (Wikipedia, 2016a).

Dans ce document, un seul aspect du smart grid sera abordé : le contrôle de la charge des foyers résidentiels. L’idée est de contrôler la puissance électrique que consomment les résidences. Ce contrôle permet d’éviter des pics de consommation trop importants, d’adapter la consommation à la production d’une électricité non-contrôlable (par exemple, l’énergie photo-voltaïque ou l’éolien) ou encore d’éviter des situations de saturation de lignes pouvant conduire dans des cas extrêmes à des coupures massives de courant (*black out*). Le contrôle de la charge passe par deux leviers : le décalage de la charge et le stockage d’énergie.

Ce document s'intéresse en particulier au stockage d'énergie. L'énergie est stockée lors des périodes de faible consommation afin d'être utilisée pendant les périodes de plus forte consommation d'électricité. Une fois de plus, différentes approches sont possible comme l'utilisation de batteries. Mais ici, le principe est d'utiliser des réservoirs d'énergie déjà existant dans les foyers en les détournant légèrement de leur utilisation première. Les deux principaux réservoirs d'énergie thermique sont les maisons elles-mêmes (via le contrôle de la température du chauffage : radiateurs électriques, convecteurs, etc...) et les chauffe-eaux.

Ces réservoirs préexistants d'énergie possèdent une capacité thermique souvent bien supérieure à une simple batterie. Par exemple, un chauffe-eau de 200 L stocke, entre son état froid (10°C) et son état chaud (60°C), plus de 11 kWh thermiques. De plus, étant déjà présents dans les foyers et avec l'arrivée des compteurs intelligents, ces réservoirs d'énergie sont facilement et économiquement intégrables au réseau. Il est alors possible d'atteindre des niveaux de stockage importants pour des investissements faibles.

1.1.1 Le projet smartDESC

Le projet smartDESC initié à l'École Polytechnique de Montréal au sein du GERAD (Groupe d'Études et de Recherche en Analyse des Décisions) et financé par le gouvernement du Canada s'inscrit pleinement dans les réflexions et recherches sur la transition énergétique et le smart grid.

L'idée maîtresse du projet smartDESC est d'appliquer la théorie des jeux à champ moyen (voir Huang et al., 2006) au contrôle d'appareils électroménagers chauffants (chauffe-eau, chauffe-espace) présents dans les foyers.

La théorie des jeux à champ moyen a été introduite en 2007 (Lasry and Lions, 2007; Huang et al., 2006) comme limite de jeux non coopératifs à un grand nombre de joueurs. L'attrait principal de la théorie des jeux à champ moyen réside dans la simplification considérable des interactions entre joueurs. Les joueurs déterminent ainsi leur stratégie optimale en considérant l'évolution de la communauté (de la foule de joueurs) dans son ensemble plutôt que l'ensemble des comportements individuels (c'est-à-dire de chacun des autres joueurs pris un par un). (Wikipedia, 2016b)

Dans le projet smartDESC, ces "joueurs" sont remplacées par des couples chauffe-eaux/contrôleurs, mais la théorie reste la même. Grâce à la théorie des jeux à champ moyen, le but est de contrôler une population de chauffe-eaux de manière optimale en limitant les communications au strict minimum et en laissant une vraie liberté individuelle à chaque individu sur sa com-

mande propre.

Pour démontrer la faisabilité d'un tel contrôle, smartDESC a développé un certain nombre d'aspects du problème :

- un algorithme de modélisation physique/numérique du chauffe-eau,
- un algorithme de contrôle en puissance des chauffe-eaux basé sur la théorie des jeux à champ moyen,
- un algorithme d'optimisation de la charge des foyers au niveau macroscopique,
- un module de simulation de réseaux de télécommunication type mesh basé sur les compteurs intelligents tels ceux récemment installés par Hydro-Québec,
- un étude sur les profils de tirage d'eau chaude dans les maisons,
- un framework de simulateur multi-agents basé sur l'outil JADE (Java Agent DEvelopment Framework).

1.1.2 Place de ce mémoire dans le projet smartDESC

L'ensemble de ces éléments produits dans le cadre du projet tend vers une finalité commune : démontrer la faisabilité via des simulations numériques d'un contrôle basé sur la théorie des jeux à champ-moyen. Ce mémoire relate le travail réalisé pour unir l'ensemble de ces modules dans un simulateur cohérent et unique afin de valider le fonctionnement de l'ensemble.

Ce simulateur est basé sur le framework développé pour le projet. Il a d'abord intégré l'algorithme de simulation thermique des chauffe-eaux et de la génération de tirage d'eau permettant de réaliser une première série d'études de cas et de contrôle de la population (voir les sections 4.1, 4.2 et 4.3). Dans un deuxième temps, la mise en place du contrôleur champ moyen et de l'optimisateur de charge a permis de réaliser des simulations utilisant la théorie CM (champ-moyen) pour contrôler la population.

Le rôle de ce simulateur est de mettre en relation tous ces éléments développés jusqu'alors indépendamment, et de les faire fonctionner ensemble en synergie ; chaque élément venant compléter et étendre la portée des autres.

1.2 Éléments de la problématique

Pourquoi pouvoir contrôler la charge des maisons est-il une capacité d'action cruciale ?

1.2.1 Consommation d'électricité domestique

La figure 1.1 représente la consommation d'énergie par secteur en 2011 en France. On remarque que le secteur résidentiel et tertiaire représente plus de 40% de la consommation totale.

Le graphique 1.2 montre la répartition de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel. Il en ressort que les éléments chauffants domestiques (chauffage et eau chaude) représentent plus de 80% de la consommation totale.

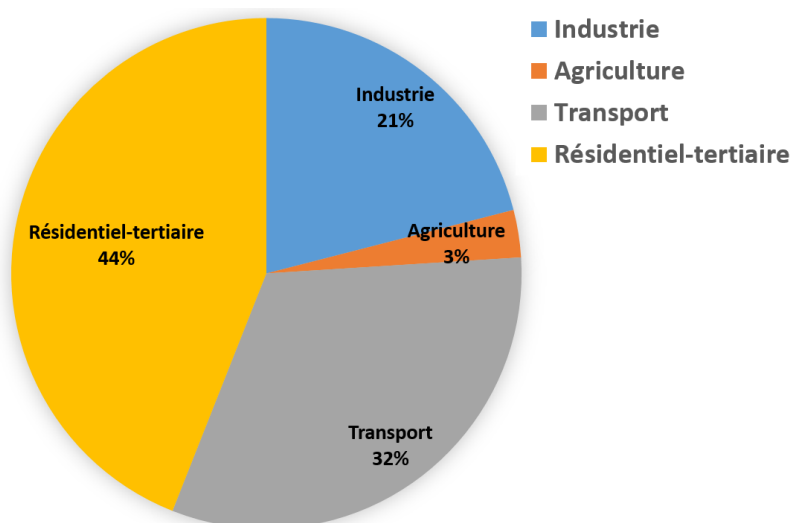


Figure 1.1 Secteurs de consommation d'énergie finale en France (*Source : SOeS (Service de l'Observation et des Statistiques)*).

Ces deux graphiques de répartition montrent que la consommation énergétique des ménages destinée au chauffage représente une part importante (*la plus importante*) dans la consommation totale d'énergie. Alors, agir sur cette consommation domestique dédiée au chauffage offre un effet de levier extrêmement important. Une modification de quelques pourcentages sur cette consommation entraîne des effets visibles à grande échelle.

Agir sur les chauffe-eau est donc très efficace mais cela implique aussi une grande responsabilité, car en cas d'un mauvais contrôle ou d'une perte de contrôle, les effets négatifs peuvent

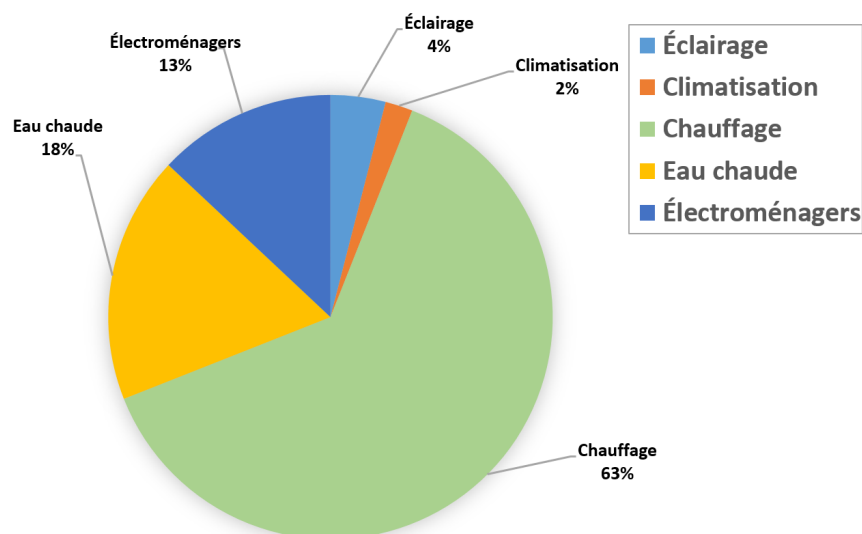


Figure 1.2 Répartition de la consommation énergétique résidentielle au Canada (*Source : Anne-Marie Riopel, UQÀM (voir Ressources naturelles Canada, 2016)*).

être importants.

Les avantages d'un tel contrôle de la consommation sont doubles : à la fois économiques et écologiques.

1.2.2 Avantages économiques

La capacité de contrôle de la charge fournit pour celui qui la possède un avantage économique important. En effet, la variation de puissance sur le réseau introduit des variations du prix instantané de l'électricité sur le marché (prix SPOT). Le graphique 1.3 issue de la base de données de EPEXSPOT, la bourse européenne de l'énergie, montre les fluctuations du prix du MWh en fonction de l'heure du jour. On note des rapports de prix allant de 1 à 7. Ainsi, en ayant un contrôle direct sur la consommation des maisons, on peut augmenter la charge sur les heures où le prix de l'électricité est faible et baisser la charge quand le MWh est cher.

De même, individuellement, le contrôle de la puissance est un levier économiquement intéressant. Le tarif D d'Hydro Québec proposé pour les foyers domestiques est calculé sur deux éléments : le kWh consommé et la puissance maximale utilisée (voir table 1.1). Ainsi, une fois de plus, en limitant la charge lors des pics de consommation, un individu est capable de réduire sa facture d'énergie.

De plus, en contrôlant la charge sur un réseau, on est capable d'augmenter sa stabilité, sa fiabilité et donc sa sécurité. . Or, on sait que les pannes de réseau sont extrêmement coûteuses

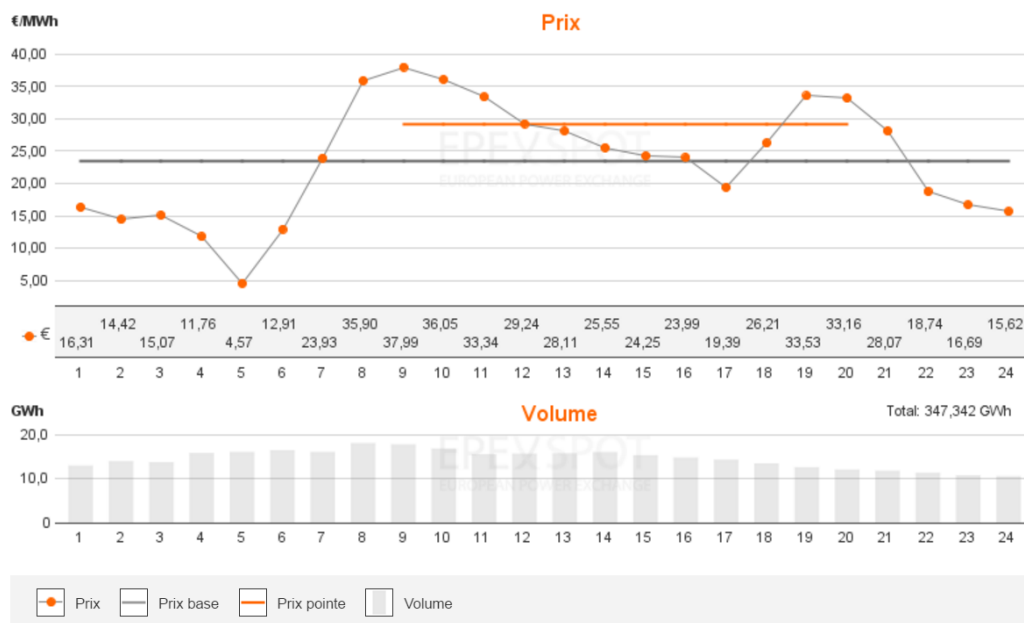


Figure 1.3 Prix SPOT de l'électricité sur le marché français, le 1^{er} février 2016. (*Source : EPEX SPOT SE*)

Tableau 1.1 Structure du Tarif D. (*Source : Hydro Québec 2016*)

Redevance d'abonnement par jour :	0,4064 \$
Prix de l'énergie	
30 premiers kilowattheures (kWh) par jour :	0,0568 \$/kWh
Reste de l'énergie consommée :	0,0860 \$/kWh
Prix de la puissance au-delà de 50 kW (kilowatts)	
En période d'hiver :	6,21 \$/kW
En période d'été :	3,15 \$/kW

pour les énergéticiens ainsi que pour les entreprises consommatrices. Une étude de l'université de Linz en Autriche a démontré que le coût d'une heure de panne d'électricité sur le territoire belge durant un jour de semaine s'évalue à plus de 120 millions d'euros (voir FEB, 2016). De même, le *black-out* géant d'août 2003 aux États-Unis aurait coûté selon les spécialistes plus de 6 milliards de dollars et la vie à 11 personnes (voir Minkel, 2008). Ainsi, stabiliser le réseau par un contrôle de la charge est un moyen efficace de réduire ce risque de *black-out* et d'accroître la facilité du redémarrage (voir section 5.1).

1.2.3 Avantages écologiques

En contrôlant la charge des maisons et par extension, la charge totale sur le réseau d'énergie, on est capable ainsi de mieux gérer la manière dont on produit cette électricité. La capacité de gestion de la charge permet une meilleure adaptabilité du réseau à l'arrivée des énergies renouvelables (EnR) non-contrôlables (éolien et solaire photo-voltaïque). En reprenant le contrôle de la consommation, il est possible de laisser une plus grande place aux énergies non-contrôlables. De plus, d'une manière plus immédiate, les fluctuations de la demande sont souvent absorbées par les centrales thermiques ce qui a un impact écologique non négligeable.

Bref, être capable de contrôler la charge des maisons, c'est offrir à un réseau électrique la capacité de devenir plus éco-responsable et résilient aux fluctuations de sa production.

1.3 Objectifs de recherche

L'objectif principal de ce mémoire a été de *mettre en place, développer et réaliser un ensemble de simulations numériques mettant à l'épreuve les théories et protocoles de gestion de chauffe-eaux développés au sein de SmartDESC*.

Durant le déploiement de SmartDESC à l'École Polytechnique de Montréal, les objectifs suivants ont été abordés et réalisés.

- Développer un environnement de simulation multi-journalier de réseaux à l'aide d'un gabarit (*framework*) basé sur JADE,
- Mettre sous forme d'algorithmes informatiques l'ensemble des théories développées et tester leur efficacité,
- Démontrer l'efficacité globale d'une architecture smart grid à champs moyen,
- Proposer des améliorations possibles dans la structure du réseau et dans l'affinage des paramètres de régulations,
- Vérifier la résilience de cette architecture réseau face à différents évènements perturbateurs.

Ce mémoire reprend et conclut sur chacun des points précédents. Il permet ainsi de fournir une synthèse générale sur la mise en application de la théorie des jeux à champ moyen aux réseaux de contrôle de la charge. Il ouvre aussi un vaste champ de recherche plus approfondi dans ce domaine.

1.4 Plan du mémoire

Dans un premier temps, ce mémoire présente successivement l'ensemble des modules, systèmes et algorithmes qui ont été développés par l'équipe de SmartDESC et qui seront intégrés progressivement au sein du simulateur.

Dans un second temps, une diversité de types de contrôle de la charge est présentée. Pour chaque type de contrôle, ses avantages et ses défauts sont explicités. Le but est de démontrer le côté novateur et performant du contrôle champ-moyen en opposition à des contrôles plus "*conventionnels*".

Enfin, dans un dernier temps, les capacités de résilience du contrôle CM face à des perturbations du réseau électrique sont étudiées.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Depuis quelques années, la transition énergétique est devenue un sujet de société majeur. En tant qu'acteur principal du progrès technique, la communauté scientifique travaille activement depuis de nombreuses années sur ce sujet et les publications y sont nombreuses et vastes. Dans le domaine plus spécifique des Smart-Grids et de la gestion de la charge, sujet traité par le présent document, la recherche s'axe sur 3 grandes directions principales :

- Production (voir Alanne and Saari, 2006)
- Stockage (voir Farhangi, 2010)
- Distribution et consommation (voir Dodrill, 2011)

En passant d'un système de production d'énergie commandé (thermique, nucléaire) à un ensemble d'énergies renouvelables non contrôlables, les compagnies d'électricité perdent progressivement le contrôle qu'elles avaient sur la production. Or, les lois d'opération des réseaux électriques imposent en tout temps une égalité entre production et consommation d'électricité incluant les pertes de transmission. Alors, toute perte de contrôle au niveau de la production doit être compensée par une prise de contrôle au niveau de la consommation et du stockage, plutôt que de faire appel à des ressources compensatoires de nature thermique comme c'est encore le cas dans la majorité des réseaux électriques (voir Stadler, 2008). Une consommation mieux gérée permet d'accroître la stabilité d'un réseau électrique et par conséquent d'accroître les capacités d'intégration des énergies renouvelables (EnR) (voir Joseph et al., 2010).

Le cas de l'intégration de l'énergie éolienne est un sujet particulièrement documenté (voir DeCesaro et al., 2009). Le principe est de stocker l'énergie lorsque la demande est faible et la production forte et de restituer cette énergie lorsque ce même rapport est inversé. Pour y parvenir, différents moyens de stockage sont étudiés :

- l'installation d'appareils de stockage domestiques dédiés tel des batteries (voir Tesla, 2015)
- la réutilisation de capacités de stockage préexistants.

Ce deuxième point se diffracte en un grand nombre d'études. L'utilisation des batteries des véhicules électriques (voir Tuffner and Kintner-Meyer, 2011) est une possibilité intéressante dans sa capacité à remettre sur le réseau l'énergie accumulée. D'autres études se sont intéressées aux éléments chauffants des maisons : chauffe-espace (Moreau and Caron, 1996; Moreau, 2010) et chauffe-eau (Koch et al., 2011). Leurs intérêts résident dans la forte puissance qu'ils sont capables d'absorber (plusieurs kW par appareil) et la grande capacité thermique (en kWh) du stockage.

En 2009, une étude de Hughes démontre la capacité technique du stockage thermique domestique (chauffe-eaux et chauffe-espaces regroupés sous la terminologie ETS, pour Electrical Thermic Storage) à absorber la production éolienne (voir Hughes, 2010). Cette étude est réalisée avec une approche énergétique, globale, agrégée et comptable et ne cherche pas à proposer une solution technique sur le contrôle. Elle introduit une relation entre la quantité optimale d'ETS et la puissance installée d'éoliennes : trop d'ETS pouvant entraîner des défauts de température, un manque d'ETS pouvant entraîner un surplus de production électrique.

Le projet smartDESC s'inspire d'étude datant de 2009 et 2012 (Moffet et al., 2012; Callaway, 2009) traitant des possibilités d'intégrer des EnR en utilisant chauffe-espaces et chauffe-eaux.

Alors, les études s'intéressent principalement au contrôle des chauffe-eaux et chauffe-espaces par délestage en conservant le contrôleur thermostatique. Ainsi, dans son article de 2009, Callaway traite du phénomène de "payback" qui survient lors de la reprise en charge des éléments thermostatiques et développe des outils mathématiques permettant d'évaluer et de prédire l'importance du "payback" déjà discuté par Malhamé and Chong (1985). Callaway et al. recherche alors à intégrer le potentiel de stockage dans le lissage de la variabilité des contributions d'éoliennes La même année, Ericson développe une méthode de minimisation du "payback" en répartissant la reprise en charge des chauffe-eaux dans le temps (voir Ericson, 2009). Cette méthode est reprise dans ce mémoire à la section 4.2.2. Enfin en 2011, une étude de Kondoh (voir Kondoh et al., 2011) développe à la fois un modèle de chauffe-eau à deux strates à géométrie variable et un contrôle basé sur une commande ON/OFF des deux éléments chauffants du chauffe-eau. Le contrôle vient se superposer aux éléments thermostatiques déjà présents.

Pour le projet smartDESC, une démarche différente a été adoptée. En effet, le contrôleur thermostatique est remplacé par un contrôleur capable d'ajuster en temps réel et de manière continue la puissance injectée dans le chauffe-eau. Ainsi, la commande ne prend pas des valeurs discrètes (souvent ON/OFF) mais une puissance comprise entre 0 et la puissance maximale admissible.

Rapidement, le problème de la commande optimale et la manière dont elle doit être traitée a été abordé (voir Laurent et al., 1995). L'utilisation de la théorie des jeux à champs moyen (voir Kizilkale and Malhamé, 2013) est apparue comme une possibilité novatrice de contrôler une large population d'acteurs avec un minimum de communication et une grande indépendance des différents acteurs. Le choix a été posé d'étudier en premier lieux le contrôle des chauffe-eaux avant d'adapter le système sur les chauffe-espaces et d'autres "batteries thermiques".

De plus, un des souhaits du projet smartDESC fût de mettre en place un environnement de simulation de réseau énergétique intelligent (développé dans ce rapport) permettant de vérifier les hypothèses formulées. Ainsi, les résultats et les propositions de contrôle introduits dans le projet sont validés par des simulations globales et multi-échelles, ce qui fait une force du projet. Le caractère multi-échelle du simulateur permet de simuler conjointement des phénomènes allant des mouvements de convection à l'intérieur du chauffe-eau jusqu'aux effets globaux d'un contrôle sur un parc de 4000 maisons.

CHAPITRE 3 PRÉSENTATIONS DES CONCEPTS ET MODULES DU PROJET SMARTDESC

Ce chapitre traite successivement les points suivants :

- le réseau électrique ;
- le chauffe-eau ;
- l’optimisation de la charge ;
- Le contrôle en champ moyen ;
- Le réseau de télécommunications ;
- Autres profils de contrôle de la pointe.

Chaque point sera présenté en commençant par une présentation théorique du concept, puis par une présentation de la mise en place pratique du module dans le simulateur.

3.1 Le réseau électrique

3.1.1 Principes théoriques

Un réseau électrique est l’ensemble des éléments permettant l’acheminement de l’électricité depuis les centrales productrices vers les maisons et lieux de consommation d’électricité. Il se traduit par un ensemble de centrales, lignes hautes, moyennes et basses tensions, des postes de transformation de tension électrique, des compteurs d’énergie et des appareils consommateurs d’électricité.

Dans l’ensemble de ce mémoire, seule la consommation domestique est étudiée. On exclut donc les réseaux de distribution industrielle et commerciale.

D’une manière générale, un ensemble de maisons est alimenté en électricité par un poste de conversion (environ 5000 maisons par poste). Le poste de conversion a la fonction de convertir le courant haute-tension (1 - 20 kV) en moyenne/basse tension (1000 - 100 V). Dans les simulations réalisées dans cet article, on essaye de simuler l’activité d’un poste de conversion et des maisons qu’il alimente. Ainsi, on retrouve toujours un nombre de maisons allant de quelques centaines à quelques milliers. Cela permet d’avoir des résultats agrégés qui sont statistiquement valables.

D’après les lois de Kirchhoff, exprimant la conservation de l’énergie dans un réseau électrique, il est considéré que : **la consommation totale de la population étudiée est égale à la somme de l’ensemble des consommations individuelles**. Aussi, la puissance totale consommée à chaque instant est égale à la somme des puissances individuelles. La puissance

réactive est négligée pour le moment et les pertes de transmission ne sont pas considérées dans notre analyse.

Une distinction est toujours faite entre la charge (=puissance) non-contrôlable et la charge contrôlable. Dans cette étude, la charge contrôlable correspond à la puissance consommée par les chauffe-eau. La charge non-contrôlable correspond à l'ensemble des autres appareils électriques des maisons.

Enfin, dans l'ensemble de ce mémoire, les résultats de puissance sont normalisés par le nombre de maisons afin d'observer la charge moyenne appliquée sur le réseau (kW/maison).

3.1.2 Aspects pratiques

Dans le simulateur, chaque maison est un acteur indépendant et autonome de la simulation (un agent) qui est relié à la source d'énergie (le *master*) par un lien qui représente une ligne électrique.

Au sein de chaque maison, une fonction génère de manière indépendante et aléatoire la charge non-contrôlable de la maison. De plus, un chauffe-eau est simulé dans chacune des maisons (voir section 3.2). À chaque pas de temps de la simulation, la simulation du chauffe-eau transmet à la maison la charge utilisée par le chauffe-eau. La maison génère sa propre charge non-contrôlable et transmet à la source d'énergie (*master*) la charge globale (non-contrôlable et contrôlable). Le *master* reçoit ainsi autant de charges qu'il y a de maisons. Il somme l'ensemble des consommations pour obtenir la charge globale de la population.

3.2 Le chauffe-eau

3.2.1 Principes théoriques

Le chauffe-eau (ou ballon d'eau chaude) est un appareil électroménager universellement répandu. Sa fonction principale est de chauffer de l'eau afin de fournir en permanence de l'eau chaude dans la maison. Il existe de nombreux types de chauffe-eaux (au gaz, instantané, thermodynamique) mais le plus répandu est le chauffe-eau électrique classique. Le principe de fonctionnement est simple : 1 ou 2 résistances électriques sont plongées dans une réserve d'eau. En faisant passer un courant électrique à l'intérieur de l'une ou l'autre des résistances, l'eau est alors localement chauffée par effet Joule. L'uniformisation de la température est ensuite réalisée par des mouvements de convection entre l'eau froide et l'eau chaude, dus à la différence de leur densité .

Fonctionnement La poussée d'Archimède force les eaux chaudes à se situer au-dessus des eaux froides, c'est à dire que le gradient de température est opposé au champ gravitationnel. Ainsi, sur le chauffe-eau, l'entrée d'eau froide est située en bas et la sortie d'eau chaude en haut afin de respecter cette dynamique.

Lors d'un tirage d'eau chaude, de l'eau froide est instantanément injectée en bas du chauffe-eau afin de maintenir un volume d'eau constant dans le chauffe-eau. Comme l'eau froide est plus dense que l'eau chaude, le système est alors stable et on peut observer une stratification de l'eau dans le chauffe-eau. La partie inférieure et froide du chauffe-eau est alors réchauffée à l'aide de l'élément chauffant du bas du chauffe-eau.

La température des chauffe-eaux est aussi un élément critique pour la sécurité sanitaire des personnes. Si une eau excessivement chaude peut créer des brûlures chez le consommateur, une eau trop tiède favorise le développement de bactéries au sein du chauffe-eau (voir Gauthier, 1996). Ainsi, sa température doit être maintenue entre des bornes bien définies.

Contrôleur thermostatique Les chauffe-eaux classiques électriques sont contrôlés de manière thermostatique. Les contrôleurs thermostatiques sont définis par deux variables : la température de consigne (habituellement autour de 60°C) et une zone de tolérance, *dead-band*, (habituellement $\pm 3^{\circ}\text{C}$). Ainsi, lorsque la température de l'eau atteint la valeur de consigne moins la zone de tolérance ($60 - 3 = 57^{\circ}\text{C}$) au niveau d'un élément chauffant, celui-ci se met en fonctionnement à sa puissance nominale (quelques kW). Lorsque l'eau ainsi chauffée atteint la température de consigne plus la zone de tolérance ($60 + 3 = 63^{\circ}\text{C}$), l'élément chauffant n'est plus alimenté en électricité. C'est un phénomène classique d'hystérésis que l'on retrouve dans les contrôleurs thermostatiques domestiques.

3.2.2 Aspects pratiques

La modélisation du chauffe-eau a été réalisée dans le cadre de smartDESC par Jérôme Solis (2015). Cette modélisation permet de simuler de manière fiable et réaliste le fonctionnement d'un chauffe-eau. Elle est basée sur la segmentation du chauffe-eau. Ainsi, le chauffe-eau est "découpée" en N couches horizontales ayant chacune une température uniforme et échangeant de la chaleur avec la couche supérieure, inférieure, les bords du chauffe-eau et les éléments chauffants, s'il y a lieu. Un algorithme traduit aussi le phénomène de convection lorsque les couches inférieures deviennent plus chaudes que les couches supérieures.

Dans le cadre de la simulation, le tirage d'eau est généré à partir de chaînes de Markov. C'est une chaîne à deux états :

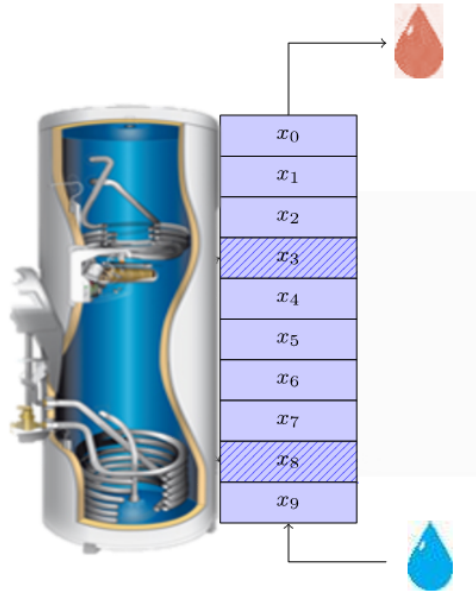


Figure 3.1 Schéma de la modélisation d'un chauffe-eau

- un état bas (0), qui correspond à une absence de tirage : le débit est nul.
- un état haut (1), qui correspond à un tirage d'eau : le débit est alors égal au débit moyen d'un tirage d'eau soit 1,31 L/m dans le cadre de cette étude.

Ces chaînes de Markov ont été générées à partir de relevés effectués par Hydro-Québec et modélisées par Shu Fan dans le cadre de sa maîtrise à l'École Polytechnique de Montréal. Elles sont associées à des paramètres de tirage agrégés. Ce sont des chaînes de Markov dont les paramètres varient dans le temps, i.e. les valeurs de transition entre les deux états de tirage changent en fonction de l'heure du jour. Deux versions de chaînes de Markov sont utilisées : une pour les jours de semaine (du lundi au vendredi) et une pour les jours de fin de semaine (samedi et dimanche). L'aspect intrinsèquement aléatoire des chaînes de Markov permet une variabilité dans les scénarios de tirages individuels. Cette variété des scénarios existe alors même que les chaînes de Markov adoptées sont communes pour l'ensemble de la population. Cette particularité permet de retranscrire les différences de comportements des individus, même si leur comportement est statistiquement identique.

Cette modélisation du chauffe-eau permet d'obtenir des équations linéaires décrivant le fonctionnement thermique du chauffe-eau. Ces équations sont une condition nécessaire pour pouvoir faire converger les équations de contrôle en champ moyen (voir section 3.4).

Les équations de la thermique du chauffe-eau permettent aussi de lier la température moyenne du chauffe-eau avec son état d'énergie. L'état d'énergie du chauffe-eau (exprimé en kWh)

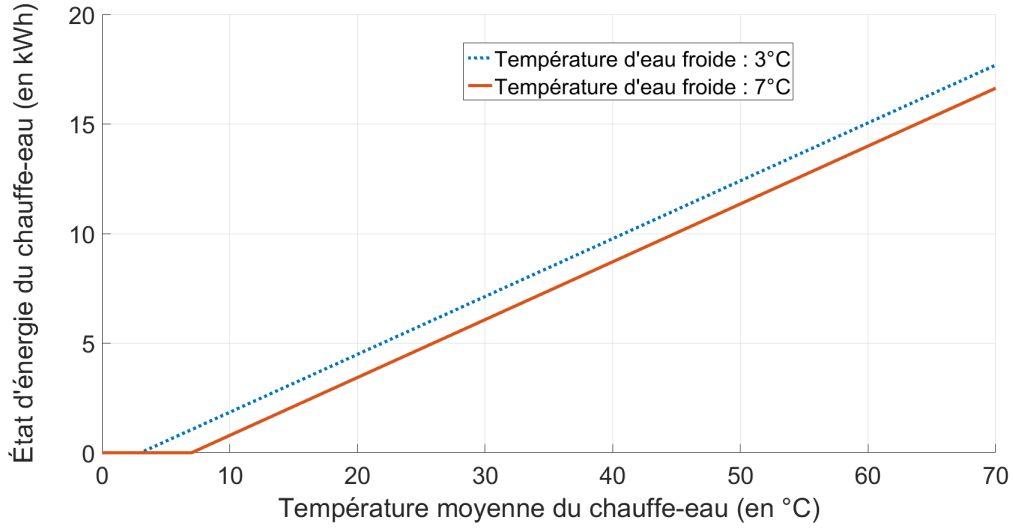


Figure 3.2 État d'énergie d'un chauffe-eau de 60 gallons en fonction de sa température interne moyenne et de la température d'eau froide.

correspond à la quantité d'énergie injectée dans le chauffe-eau pour passer de l'état au repos (chauffe-eau rempli d'eau froide) à la température moyenne actuelle. Le graphique 3.2 donne cette relation entre la température moyenne du chauffe-eau et l'état d'énergie pour deux températures d'eau froide données¹.

Le module de simulation de chauffe-eau fonctionne de manière conjointe et en interaction avec le module de maison (voir section 3.1) et avec le module de contrôle (voir section 3.4). Le module de contrôle permet de déterminer la puissance injectée dans le chauffe-eau durant le pas de temps en cours et le module de maison permet de faire remonter la charge du chauffe-eau jusqu'au module d'agrégation (*master*).

3.3 L'optimisation de la charge électrique du réseau

3.3.1 Principes théoriques

Afin de maintenir un réseau électrique stable (tension et fréquence constante), il est indispensable d'équilibrer en permanence la production et la consommation d'énergie électrique. Ainsi, il est préférable d'avoir un profil de charge le plus "lisse" et stable possible, car cela est facile à gérer et moins coûteux. En effet, pour chaque pic de consommation, il est nécessaire de mettre en route de nouvelles centrales, souvent plus chères et plus polluantes. Inversement,

1. La température de l'eau froide dépend de la saison de l'année. Elle est proche de 3°C en hiver et de 10°C en été.

lors des creux de consommation, il est nécessaire de sortir certaines centrales de leur point de fonctionnement optimal. Cela a pour effet de diminuer le rendement des centrales électriques et d'augmenter les coûts de production.

De plus, l'arrivée croissante des énergies renouvelables diffuses non-contrôlables (solaire photovoltaïque, éolien) crée un stress et une variabilité toujours plus grande sur les réseaux de distribution d'électricité.

Ainsi, il apparaît clairement la nécessité d'avoir un contrôle sur la demande. Le gain permis par un tel contrôle est à la fois technique, en permettant une plus grande proportion d'énergie renouvelable sans perturber le réseau, et à la fois économique, en permettant de limiter la consommation lorsque l'énergie est la plus chère.

Le but de ce projet est de réaliser un contrôle et une optimisation de la charge. Il ne s'agit pas de réduire celle-ci. En effet, puisque l'on ne change pas les habitudes du consommateur, le bilan énergétique avant et après optimisation et contrôle reste identique.

Ainsi, le rôle principal de l'optimisateur est de produire une commande qui permet de lisser la charge. L'optimisateur génère une commande permettant de faire correspondre la demande globale des maisons avec le profil de consommation optimal (voir section 3.6).

Dans le cadre de son doctorat à l'École Polytechnique Montréal, et au sein du projet smart-DESC, Adham Ismail a développé un algorithme d'optimisation de la charge qui, à partir d'une prédiction de charge non-contrôlable (incluant ou non la production d'énergie non-contrôlable), produit une commande unifiée pour l'ensemble des chauffe-eaux de la population étudiée. Cette commande produit en sortie 24 températures moyennes de consigne pour les 24 prochaines heures à venir. L'ensemble de la population doit, en moyenne, atteindre à la fin de chaque heure la consigne qui a été donnée. Son algorithme utilise une simulation d'un chauffe-eau hypothétique qui agit comme l'agrégat des chauffe-eaux de la population contrôlée soumis à l'agrégat des demandes d'eau chaude des chauffe-eaux individuels (voir section 3.6.2).

Cet algorithme utilise en entrée un certain nombre de paramètres comme les caractéristiques des chauffe-eaux, le nombre de maisons contrôlées, la température moyenne à l'instant t (qui peut éventuellement être déterminée à partir de la dernière température de consigne du jour précédent) et les prévisions de consommations non-contrôlables pour la journée à venir. À partir de ces données, l'optimisateur génère 24 températures qui sont envoyées à l'ensemble des chauffe-eaux contrôlés.

Cet algorithme est aussi capable de gérer une prévision de charge non-contrôlable stochastique. Ainsi, au lieu d'accepter en entrée une seule prévision de demande, l'algorithme est

capable de recevoir N scénarios avec N probabilités différentes de réalisation. L'algorithme fournit alors une seule et unique consigne de 24 températures qui prend en compte les différents scénarios proposés.

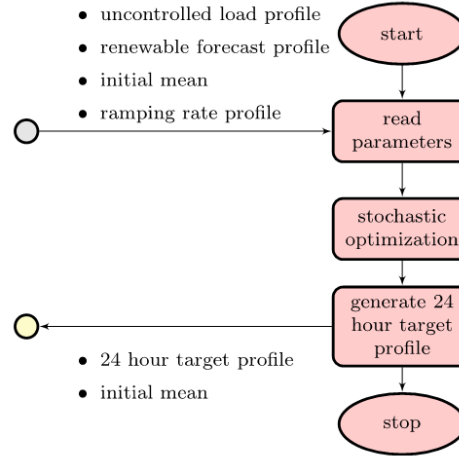


Figure 3.3 Représentation en schéma-bloc de l'algorithme d'optimisation de la charge

3.3.2 Aspects pratiques

Le programme algorithmique fourni par Adham Ismail se présente sous la forme d'une boîte noire avec des entrées/sorties bien définies. En effet, le code est écrit en C++, puis converti en une bibliothèque partagée Linux (.so) lisible par le simulateur (codé en JAVA) grâce à l'interface multilanguage JNA (Java Native Access).

Ainsi, au début de chaque jour, ou chaque fois que cela est nécessaire², l'algorithme d'optimisation de la charge est appelé avec les différents paramètres évoqués ci-dessus. Le code fournit alors 24 nouvelles consignes de température qui sont transmises à l'ensemble des chauffe-eaux connectés. Ces consignes sont alors analysées par le contrôleur champ moyen, qu'il convient à présent d'introduire.

3.4 Le contrôle en champ moyen.

3.4.1 Principes théoriques

Comme présenté dans la section 3.2, en 2016, le contrôle de la puissance injectée dans la plupart des chauffe-eaux se fait de manière purement thermostatique, c'est à dire que seuls

². Lorsque la réalité s'écarte de la prédiction, il devient alors important de générer une nouvelle commande pour éviter une erreur trop importante.

les tirages d'eau chaude et les pertes thermiques commandent la puissance injectée dans le chauffe-eau.

Le contrôleur champ moyen développé dans le cadre du projet smartDESC a vocation à se substituer au contrôleur thermostatique classique. Il doit être capable de recevoir et interpréter la commande globale transmise par l'algorithme d'optimisation de la charge (voir 3.3).

Comme expliqué dans l'introduction, le but recherché par le projet smartDESC est d'arriver à fournir une commande individuelle et personnelle à chaque chauffe-eau en utilisant un minimum de moyens de télécommunications et en respectant au mieux la vie privée et la sécurité. Ainsi, la commande envoyée par l'optimisateur de charge est commune à l'ensemble des chauffe-eaux, mais elle est interprétée localement par le contrôleur champ moyen de façon individuelle et personnalisée pour chaque chauffe-eau, en fonction du contexte local.

En suivant les principes de la théorie des jeux à champ moyen (voir (Huang et al., 2006)), on s'assure que pour un ensemble suffisamment grand (au sens statistique), la trajectoire de la moyenne des températures du parc de chauffe-eaux soit égale à la consigne fournie par l'optimisateur.

Ainsi, chaque contrôleur champ moyen devrait en pratique se présenter comme un boîtier intelligent, relié aux éléments chauffants du chauffe-eaux ainsi qu'au réseau de télécommunications choisi. Son rôle est donc, à partir de la consigne reçue de l'optimisateur et de l'état thermique du chauffe-eau, de générer une puissance pour chacun des deux éléments chauffants. En d'autres termes : le contrôleur champ moyen traduit en temps réel la consigne globale (24 températures) en une puissance individualisée à appliquer à chaque élément du chauffe-eau.

La capacité du contrôle en champ moyen de générer une commande individuelle et personnalisée localement est l'un des points forts du projet. En effet, on s'abstient ainsi de calculer une commande individuelle pour chaque chauffe-eau du parc, puisque la commande globale qui est transmise à l'ensemble des chauffe-eaux est adaptée à la situation individuelle de chaque chauffe-eau.

Cette notion de justice/d'équité est très présente au sein de l'algorithme de contrôle en champ moyen. En effet, les chauffe-eaux les plus froids participent moins que les chauffe-eaux les plus chauds aux efforts de réduction de la pointe. On remarquera aussi que la position relative des chauffe-eaux les uns par rapport aux autres varie en permanence lors des simulations (voir section 4.4.2). Ainsi, les chauffe-eaux les plus chauds de la population étudiée peuvent quelques heures plus tard se retrouver parmi les chauffe-eaux les plus froids. Un certain équilibre est préservé et chaque chauffe-eau contribue à la commande donnée selon

ses capacités actuelles.

De plus, le champ moyen permet de préserver une variabilité de la température des chauffe-eaux autour de la température de consigne, ce qui est crucial puisque c'est cette même variabilité des états qui donne la marge de manoeuvre nécessaire pour réagir à un changement éventuel de la commande collective.

Enfin, actuellement, l'algorithme de commande champ-moyen n'est capable de fonctionner qu'avec une consigne constante par morceaux. Cette incapacité à suivre une consigne continue et "lisse" peut générer des pics de consommation au niveau de la commande finale.

Dans un premier temps, on peut considérer que la commande en puissance générée par le champ-moyen est proportionnelle à l'écart entre la commande thermique et la température moyenne du parc contrôlé. Au début d'une nouvelle heure, une nouvelle consigne est fournie aux contrôleurs champ-moyen. L'écart entre la température de consigne et la température moyenne du parc est maximal. Donc l'amplitude de la commande en puissance est maximale. À la fin de l'heure, logiquement, la température du parc est au plus proche de la commande thermique. L'amplitude de la commande en puissance est donc minimale. Ainsi, le champ-moyen va réagir fortement à la consigne en début d'heure et plus faiblement en fin d'heure, créant ainsi des pics et des creux au niveau de la charge électrique des chauffe-eaux.

Pour palier ce problème, l'algorithme en champ-moyen réalise une interpolation linéaire de la commande horaire en une commande aux 15 minutes qui permet de lisser la commande en puissance fournie par les contrôleurs champ-moyen.

3.4.2 Aspects pratiques

Comme pour l'algorithme d'optimisation de la charge, le module de contrôleur champ moyen se présente comme une bibliothèque partagée Linux codée en C++ interfacée avec le simulateur via JNA.

À chaque fois que l'algorithme d'optimisation de la charge génère une nouvelle commande de 24 températures, celle-ci est envoyée à l'ensemble des contrôleurs afin qu'ils mettent à jour la trajectoire optimale à suivre. À chaque pas de temps de la simulation, le chauffe-eau interroge le contrôleur champ moyen sur la puissance qu'il doit injecter durant le pas de temps pour chaque élément chauffant. À partir de la consigne, de la température du chauffe-eau et de la présence ou non d'un tirage d'eau, le contrôleur décide des puissances à injecter et les transmet au chauffe-eau (voir figure 3.4). Enfin, de manière aléatoire suivant une loi de Poisson, les contrôleurs émettent vers l'optimisateur la température du chauffe-eau. Cet échantillonnage aléatoire permet à l'algorithme d'optimisation de maintenir à jour la température moyenne

de la population. Il faut considérer en moyenne 4 remontées de température par chauffe-eau par jour pour maintenir une information (température moyenne du parc de chauffe-eaux) cohérente avec la réalité, tel que démontré plus loin dans ce mémoire (voir section 4.4.4).

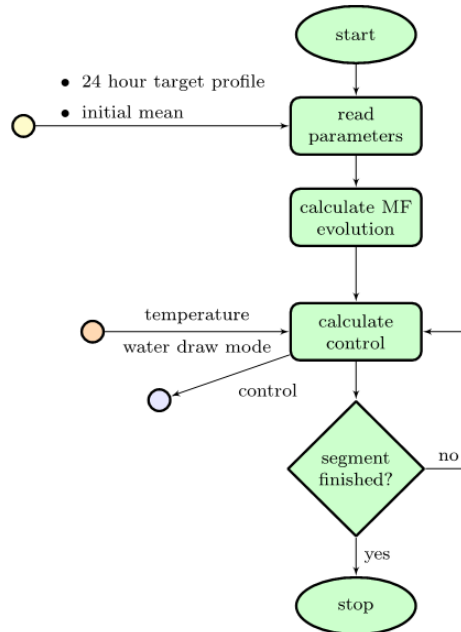


Figure 3.4 Représentation en schéma-bloc de l'algorithme de contrôle en champ moyen.

Le calcul lié à l'algorithme de champ moyen dure entre 1 à 10 secondes par contrôleur local sur un fil d'exécution tournant à 3 GHz.

3.5 Le réseau de télécommunications

3.5.1 Principes théoriques

Les simulations de contrôle de la charge ne sauraient être pleinement réalistes si elles n'incluaient pas une dimension propre à la télécommunication et au transfert d'informations entre les différents acteurs du système.

Le module chargé de réaliser la simulation du réseau de télécommunications est basé sur le fonctionnement d'un réseau de type "mesh/grid". Ce choix a été posé afin de reproduire le fonctionnement des compteurs d'électricité installés par certaines compagnies d'électricité en Amérique du Nord. Ainsi, il est établi que chaque maison joue le rôle d'un noeud du maillage de télécommunications. Elle est chargée de recevoir et transmettre les informations d'un voisin direct à un autre, jusqu'à ce que le message arrive à sa destination finale.

3.5.2 Aspects pratiques

Dans le simulateur, le réseau de télécommunications est le centre névralgique du lien entre les différents agents. Ce module a été développé par Filippo Malandra dans le cadre de sa thèse en réseaux de télécommunications sans-fil de type "mesh" à l'École Polytechnique de Montréal.

À chaque pas de temps, les agents envoient au module de télécommunications le ou les message(s) qu'ils ont besoin de transmettre ainsi que le ou les destinataire(s) correspondant(s). Le module de télécommunications réalise alors une simulation parallèle, avec un pas de temps beaucoup plus fin, propre au monde de la télécommunication (de l'ordre de la milliseconde), afin de simuler le transfert des messages depuis leurs noeuds de départ jusqu'aux noeuds d'arrivée. Cette simulation prend en compte les phénomènes d'interférence, de perte de paquet, de distance entre les différentes maisons ainsi que les politiques d'acheminement, de transmission et de retransmission de paquets.

Lorsqu'un message arrive à son destinataire dans la simulation du réseau de télécommunications, celui-ci est alors transmis par le module de télécommunications à l'agent destinataire dans la simulation principale.

En d'autres mots, il y a deux simulations qui tournent conjointement.

1. La simulation principale, avec un pas de temps de quelques minutes, qui traite principalement d'aspects énergétiques liés à la thermique des chauffe-eaux et au contrôle de la charge.
2. La simulation de télécommunications, avec un pas de temps beaucoup plus rapide (de l'ordre de la milliseconde) qui s'occupe uniquement de la physique liée au transfert de messages entre les acteurs de la simulation principale. C'est par cette simulation que l'ensemble des messages transitent. Elle permet de générer le délai qui existe entre émission et réception.

Le figure 3.5 relate visuellement cette dualité entre les deux simulations, qui fonctionnent de manière simultanées, synchrones et cohérentes. Les deux réseaux ont des topologies de connexion entre les agents différentes. En effet, alors que la topologie de la simulation principale est calquée sur les lignes de distribution d'électricité, celle de la simulation de télécommunications est basée sur la position géographique des maisons.

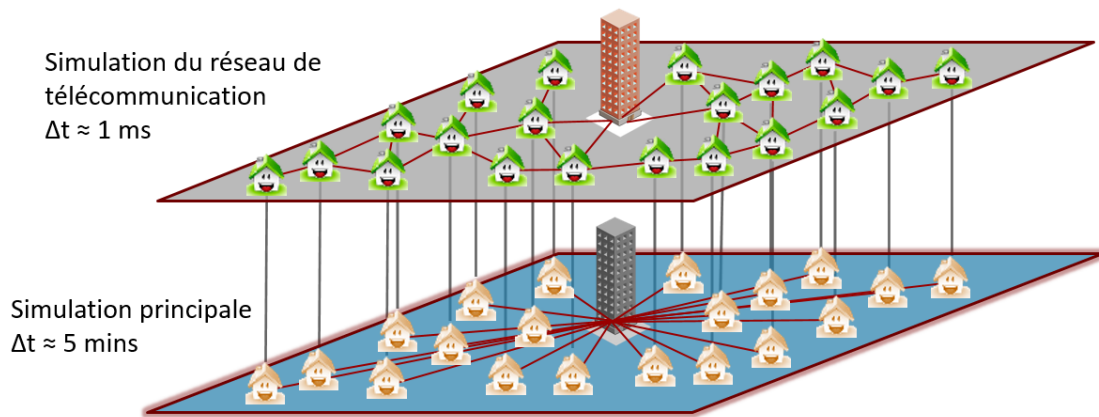


Figure 3.5 Représentation schématique des deux niveaux de simulation

3.6 Profils d'optimisation de la charge

Lorsque l'on cherche à optimiser un profil de charge, il est important de savoir quel est le but final que l'on recherche. Dans ce paragraphe, deux types de profil d'optimisation de la charge sont présentés. Le graphique 3.6 représente la consommation électrique par maison durant la semaine du Nouvel An 2014. Cette semaine correspond à la semaine de pic de consommation d'électricité au Québec pour l'année 2013-2014. Ces données proviennent de compteurs SCADA de la Coopérative régionale d'électricité St-Jean-Baptiste-de-Rouville (voir Coop, 2016), pour environ 6000 clients.

Sur ce graphique, deux courbes sont représentées. La courbe inférieure correspond à la charge non-contrôlable. C'est-à-dire l'ensemble des activités autres que le fonctionnement du chauffe-eau. La deuxième courbe correspond à la puissance dédiée au fonctionnement des chauffe-eaux, c'est-à-dire à la charge contrôlable. Dans ce premier graphique, aucun contrôle n'est appliqué aux chauffe-eaux. Seul le contrôleur thermostatique interne aux chauffe-eaux est à l'oeuvre.

La désagrégation du signal (différentiation entre charge contrôlable et non-contrôlable) est expliqué plus spécifiquement dans la section 4.1.

Dans la suite, deux profils optimaux sont exposés. Ils ont chacun leurs particularités, leurs avantages et leurs défauts. Dans les deux cas, ces profils respectent le principe de conservation de l'énergie.

En effet, le contrôle effectué sur les chauffe-eaux ne modifie pas les habitudes de tirages d'eau des utilisateurs. Ainsi, la quantité d'énergie utilisée par tirage d'eau chaude est la même, avant

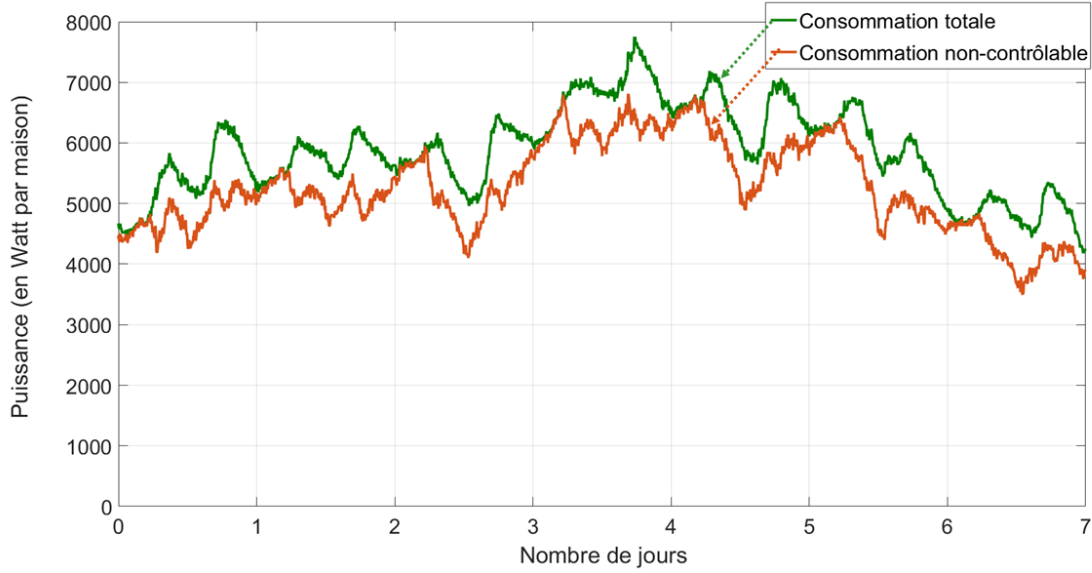


Figure 3.6 Consommation moyenne par maison issue de données SCADA réelles.

et après contrôle. Les pertes thermiques des chauffe-eaux dépendent de la températures de l'eau. Cependant, en considérant que les pertes thermiques sont négligeables devant la quantité d'énergie nécessaire à faire chauffer l'eau, on peut considérer que les bilans énergétiques sur le long terme sont donc identiques.

3.6.1 Optimisation en moyenne glissante

Dans ce type d'optimisation, la charge idéale que l'on essaye d'obtenir correspond à une moyenne glissante de la charge sans contrôle (courbe supérieure du graphique 3.6). On définit une durée D de la fenêtre de la moyenne en fonction des capacités de stockages (ici $D \approx 12$ h). La puissance souhaitée à l'instant t est définie par la fonction suivante :

$$\mathcal{P}^*(t) = \frac{1}{D} \int_{t-D/2}^{t+D/2} P_{ts}(u) du, \quad (3.1)$$

avec \mathcal{P}^* le profil optimisé de la charge et P_{ts} la charge sans contrôle (en mode thermostatique). D'après la linéarité de la fonction intégrale, l'énergie est conservée au cours du temps.

En appliquant ce profil d'optimisation à la courbe du graphique 3.6 avec une moyenne glissante sur 12 heures, on obtient le profil optimisé illustré à la figure 3.7 ;

Les avantages liés à ce profil sont les suivants :

- simplicité des calculs et de la compréhension de la physique lié à cette optimisation.

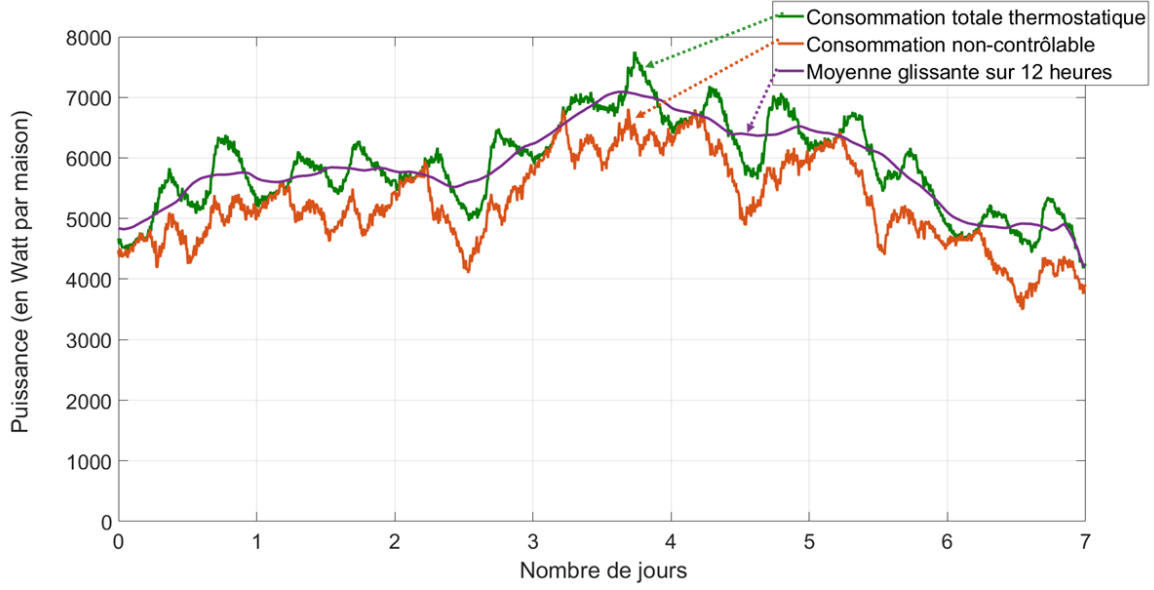


Figure 3.7 Profil optimisé de la charge généré avec une moyenne glissante sur 12 heures.

- trajectoire douce et stable : les changements de puissance sont lents et progressifs.

Les défauts liés à ce profil sont les suivants :

- il est nécessaire de connaître au moins 6 heures à l'avance la charge.
- il faut être capable d'identifier sans erreur la charge contrôlée et non-contrôlée.
- il est nécessaire de mettre en place un mécanisme de correction lorsque la demande réelle est différente de la demande estimée.
- il arrive que la courbe désirée passe sous la courbe de puissance non-contrôlable, devenant ainsi irréalisable.

Ce profil est intéressant lorsque la population commandée consomme une puissance faible par rapport à celle de l'ensemble de la population agissant sur le réseau³. Il procure simplement et rapidement une solution permettant de réduire les pics et les creux de consommation.

3.6.2 Minimisation de la variation de puissance

Ce type d'optimisation essaie de réduire au maximum la somme des valeurs absolues des variations. Elle veut minimiser la fonction de coût suivant : $\min(J_{P^*})$ avec :

$$J_{P^*} = \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{dP^*(t)}{dt} \right| dt \quad (3.2)$$

3. Si le ratio MaisonsPilotees / MaisonsTotales devient significatif, alors l'optimisation en moyenne glissante influe sur elle-même. Il devient alors très compliqué ou impossible d'évaluer la proportion de charge non-contrôlable et contrôlable.

avec T la durée du profil à optimiser (dans le cas de la figure 3.8, $T = 7$ jours), et P^* le profil de puissance optimisé.

Cette minimisation est réalisée conjointement avec la simulation d'un agrégat des chauffe-eaux soumis à l'agrégat des demandes d'eau chaude des chauffe-eaux individuels, i.e. à un chauffe-eau moyen qui représente l'ensemble de la population. Ainsi, la minimisation est réalisée sous la condition que la température de ce chauffe-eau moyen est contenue entre 50°C et 60°C.

Concrètement, cela revient à prendre la courbe de consommation non-contrôlable et à rajouter la puissance contrôlable afin de créer une courbe de consommation en plateau (constante par morceaux).

L'algorithme réalisant la minimisation de la fonction J est basé sur de l'optimisation linéaire.

La conservation de l'énergie consommée entre la courbe non optimisée (graphique 3.6) et ce profil optimisé est assurée par la simulation d'un chauffe-eau moyen dans l'algorithme d'optimisation linéaire :

Pour chaque instant t de l'optimisation, l'algorithme calcule la température d'un chauffe-eau moyen (qui correspond à la moyenne des chauffe-eaux de la population contrôlée) en utilisant l'écart de puissance entre la courbe optimale et la courbe de charge non-contrôlable. En empêchant ce chauffe-eau de dépasser des bornes en températures (50°C et 60°C dans la plupart des cas), on s'assure que la consommation d'énergie par les chauffe-eaux sera la même au cours d'une simulation suffisamment longue⁴. La température de ce chauffe-eau moyen peut alors devenir une commande en température à envoyer à l'ensemble des chauffe-eaux contrôlés.

Ce profil d'optimisation est celui utilisé par l'optimisateur global présenté à la section 3.3.

Les avantages liés à ce profil sont les suivants :

- il génère à la fois une commande en puissance et en température (les deux peuvent être utilisées) ;
- il s'assure que les chauffe-eaux restent dans une zone de confort optimal, même en cas d'erreur d'évaluation de la charge ;
- il accepte d'utiliser une prévision non-déterministe de la charge non-contrôlable .

Les défauts liés à ce profil sont les suivants :

- il est coûteux en calcul et en complexité mathématique
- la fonction en paliers peut être problématique pour le producteur d'électricité : grande

4. Au bout d'un temps suffisamment long, l'écart éventuel de température entre les chauffe-eaux contrôlés et ceux non-contrôlés devient négligeable au regard de la consommation globale.

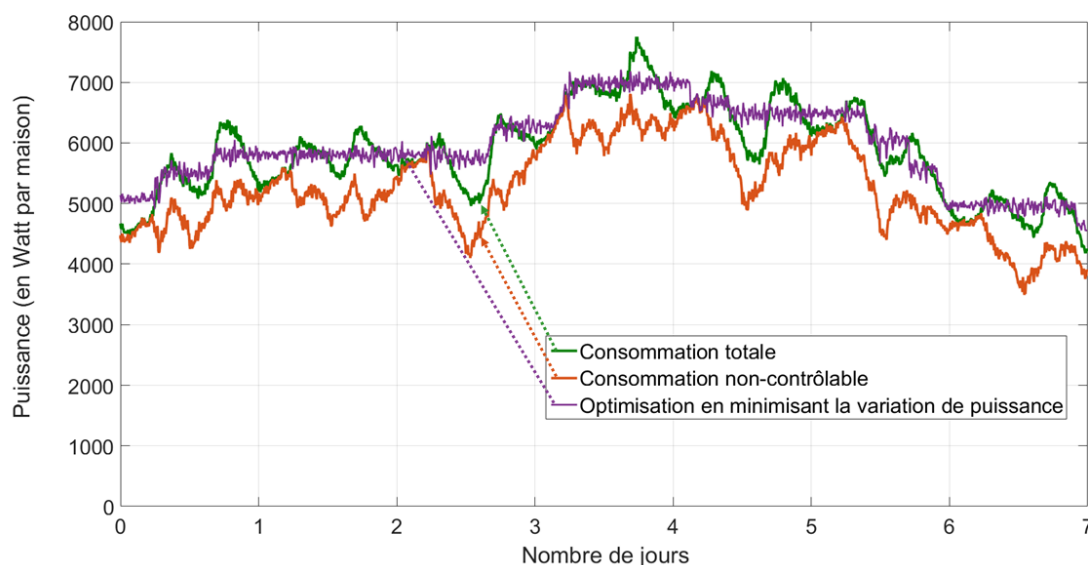


Figure 3.8 Profil d'optimisation en minimisant la variation de puissance.

variation de puissance de manière instantanée.

- la prédiction de la consommation d'eau chaude (chaînes de Markov dans cette étude) doit être précise pour avoir une correspondance parfaite entre le chauffe-eau agrégé de l'optimisation et la réalité du parc commandé.

Finalement, ce type de profil est très adapté pour une population contrôlée importante et s'accorde parfaitement avec un contrôleur champ moyen (voir section 3.4), car il est capable de fournir une commande en température pour les chauffe-eaux.

Ce profil sera utilisé dans la suite du document pour les simulations en champ-moyen.

3.7 Simulateur et interactions entre les différents modules

Dans cette section, le fonctionnement global du simulateur en version *champ-moyen avec optimisateur stochastique* est présenté. Ainsi, les interactions entre les différents modules et l'architecture en résultant sont analysées.

La figure 3.9 représente l'architecture logicielle du simulateur. L'ensemble des agents JADE est représenté. On retrouve en haut, l'agent Ordinateur Central qui centralise à la fois :

- les opérations d'optimisation de la charge, gérées par une bibliothèque partagée C++ (en vert)
- le réseau de télécommunications (en rose) qui s'occupe des transferts de messages entre l'ordinateur central et les chauffe-eaux

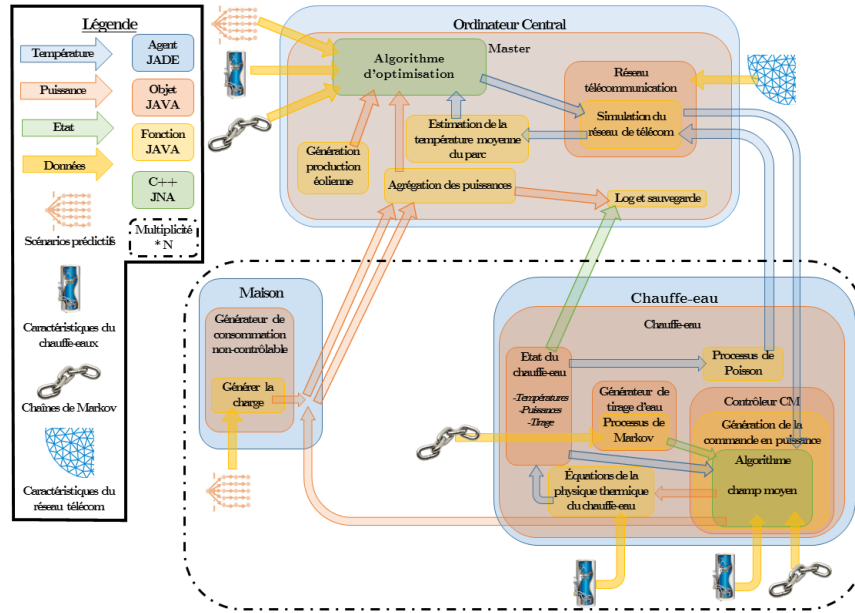


Figure 3.9 Schéma global du simulateur en fonctionnement champ moyen avec optimisateur stochastique : (agrandi en annexe A)

- la fonction d'estimation de la température moyenne du parc : qui récupère les messages venus des chauffe-eaux et les transmet à l'algorithme d'optimisation
- la fonction de sauvegardes et de *logs* de la simulation

On retrouve ensuite, avec une multiplicité N allant de 1 à 10 000⁵ les "couples" maison - chauffe-eau. L'agent Maison a deux rôles précis :

- générer la charge non-contrôlable à partir d'un fichier de données
- transmettre cette charge et celle du chauffe-eau à l'ordinateur central. Cette transmission de nature électrique ne transite pas par le réseau de télécommunications. Elle utilise un lien direct et instantané.

L'agent Chauffe-Eau regroupe les modules suivantes :

- l'algorithme de champ-moyen qui reçoit de l'ordinateur central les 24 températures de consigne et la température moyenne du parc, et qui génère à partir de l'état du chauffe-eau et du tirage d'eau, une puissance à injecter dans le chauffe-eau.
- l'algorithme de simulation thermique du chauffe-eau récupère cette puissance et génère un nouvel état thermique du chauffe-eau.
- le générateur de tirage d'eau, basé sur un processus de Markov.

On retrouve ici l'ensemble des fonctions et caractéristiques décrit pour chaque module in-

5. À partir de 10 000 maisons, le nombre d'accès simultanés à certains fichiers de configuration dépasse la valeur maximale autorisée par le système d'exploitation Linux. Un système de base de données en cours de déploiement dans le framework du simulateur devrait permettre d'accroître cette valeur.

dépendant dans ce chapitre. Un travail important a été fourni pour intégrer les différents modules et les faire fonctionner de manières cohérentes et constructives. Le simulateur réagit ainsi comme un écosystème : l'algorithme de champ-moyen trouve son accomplissement dans la réalisation des commandes générées par l'algorithme d'optimisation, l'algorithme d'optimisation utilise l'algorithme de champ-moyen pour générer sa commande.

CHAPITRE 4 TYPES DE CONTRÔLE ET CONFRONTATION DES RÉSULTATS

Dans ce chapitre, plusieurs types de contrôles sont étudiés. Chacun de ces contrôles a été implémenté et testé au sein de l’environnement de simulation de réseau. D’une manière générale, les contrôles sont présentés du plus simple au plus complexe.

À la fin du chapitre, un tableau récapitule l’ensemble des caractéristiques de chacun des contrôles.

Dans l’ensemble de ces simulations, nous utilisons comme charge non-contrôlable celle fournie par les données SCADA durant le pic hivernal 2013-2014, qui a déjà été introduite dans la section 3.6.

4.1 Contrôleur thermostatique classique

4.1.1 Désagrégation de la charge

Les données SCADA récupérées auprès d’une coopérative d’électricité de la banlieue de Montréal (voir Coop, 2016), proviennent de 4 postes de transformation d’électricité. Ce sont donc des données agrégées d’environ 6000 foyers. Après une normalisation de la charge en divisant la puissance totale par le nombre de clients, la courbe de la demande moyenne par maison est obtenue. La semaine du 30/12/2013 au 05/01/2014 a été choisie pour cette étude afin d’étudier le pic de consommation hivernal qui a eu lieu le 1 janvier 2014 vers 17h00.

Cette courbe, en verte sur la figure 3.6, correspond alors à la demande globale (non-contrôlable + contrôlable). Il est alors capital de trouver un moyen de désagréger la charge.

Pour y parvenir, les hypothèses suivantes ont été considérées :

- les foyers sont tous équipés d’un chauffe-eau 60 gallons de puissance 4500W ;
- les chauffe-eaux sont tous équipés de contrôleurs thermostatiques classiques ;
- les foyers suivent un tirage d’eau respectant les chaînes de Markov utilisées¹ ;
- la température d’entrée d’eau froide est équivalente à celle constatée à l’époque sur le viaduc de Montréal (= 3°C).

Ainsi, en simulant le fonctionnement d’un grand nombre de chauffe-eaux, équipés de contrôleurs thermostatiques, on obtient la consommation moyenne d’un chauffe-eau au cours d’une

1. Ces chaînes de Markov ont été établies à partir de mesures réelles réalisées dans des foyers au Québec (voir 3.2.2).

journée. Deux facteurs sont susceptibles de modifier cette consommation : la température d'entrée d'eau (ici fixée à 3°C) et les chaînes de Markov de tirage d'eau (ici différenciées entre les jours de semaine et les jours de fin de semaine).

Par la simulation de 5000 chauffe-eaux durant 5 jours, les deux courbes du graphique 4.1 sont obtenues. Pour les conditions initiales, toutes les couches des chauffe-eaux sont initiées à une température de 55°C. La première journée de simulation n'est pas prise en compte dans le calcul de la moyenne. Le rôle de la première journée est de générer une population variée de chauffe-eaux et qui soit statistiquement représentative de la réalité. Autrement dit, la première journée permet de supprimer le biais dû à l'initialisation de la simulation.

Il est important de noter que le fonctionnement des chauffe-eaux est un mécanisme ON/OFF, de tout ou rien. Ainsi, individuellement chaque chauffe-eau consomme soit 0 watt soit 4 500 watts. Les courbes 4.1 ne sont qu'une moyenne sur l'ensemble des chauffe-eaux simulés. D'une certaine façon, la puissance moyenne à un instant t correspond à la puissance nominale d'un chauffe-eau (4 500 watts) multipliée par la probabilité d'être dans l'état ON.

On peut noter une réelle différence entre les jours de semaine et les jours de fin de semaine avec en particulier un décalage de la pointe matinale de consommation qui correspond à un lever plus tardif des individus durant la fin de semaine.

Ainsi, on peut aisément soustraire les courbes de la figure 4.1 à la charge moyenne totale par maison issue des données SCADA en respectant les jours de semaine et les jours de fin

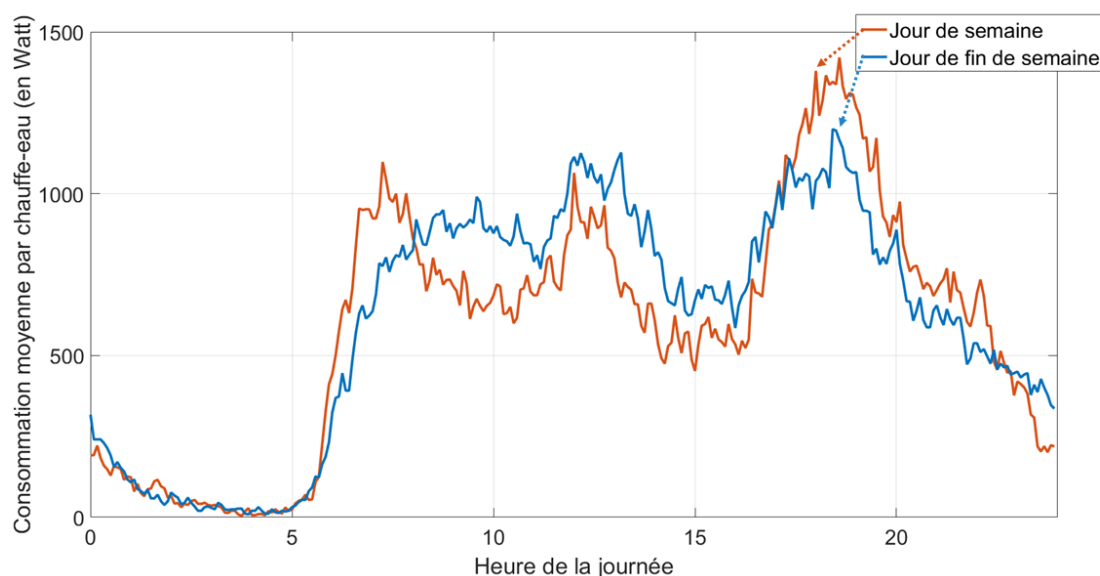


Figure 4.1 Courbe de consommation moyenne d'un chauffe-eau au cours d'une journée.

de semaines. On obtient alors la charge moyenne non-contrôlable telle que montrée dans la figure 3.6. La charge moyenne des chauffe-eaux est elle contrôlable.

Cette désagrégation de la charge totale en charge contrôlable et charge non-contrôlable est utilisée dans toute la suite de ce chapitre.

Comme expliqué à la section 3.1, la courbe de charge non-contrôlable est utilisée par les maisons pour générer les consommations autres que celle du chauffe-eau. Chaque maison génère sa propre consommation non-contrôlable de manière indépendante. Cependant, en moyenne, et à l'aide de la loi des grands nombres, la consommation non-contrôlable des maisons est égale à la courbe obtenue précédemment.

4.1.2 Première étude et vérification du simulateur

La première simulation qui a été réalisée pleinement par le simulateur est une simulation avec contrôleurs thermostatiques. Le but recherché dans cette simulation est de reproduire la courbe de consommation totale issue des données SCADA à partir de la consommation non-contrôlée des maisons et de la charge issue des chauffe-eaux en fonctionnement thermostatique. La finalité de cette simulation est de certifier le bon fonctionnement global du simulateur et de s'assurer que l'interfaçage entre les différents modules est opérationnel.

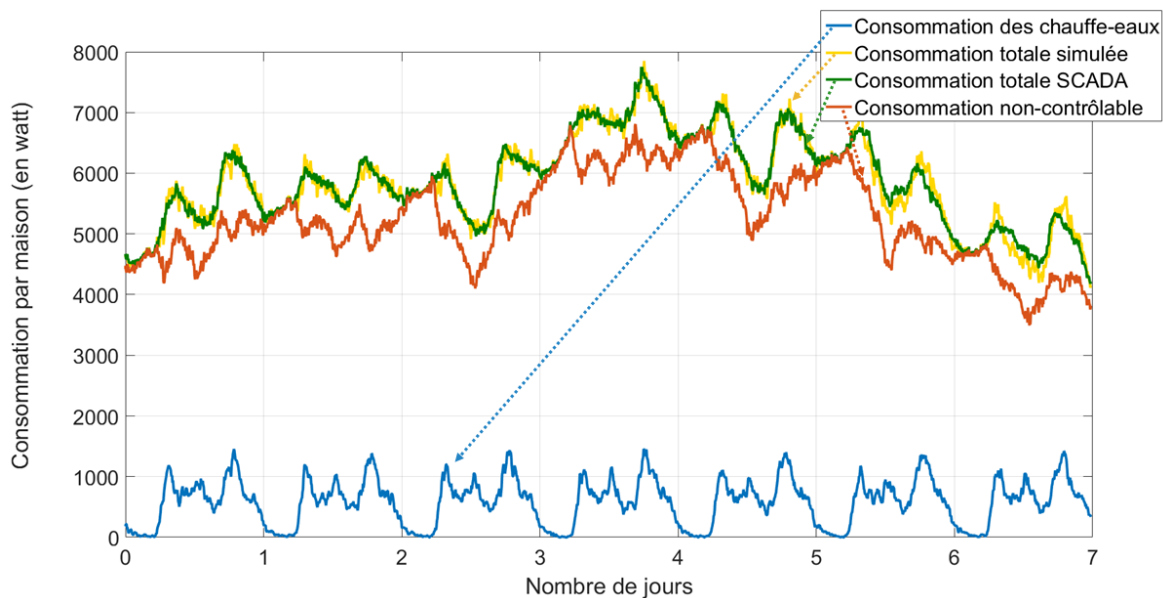


Figure 4.2 Simulation de 400 maisons avec contrôleur thermostatique : courbes de charge contrôlable, non-contrôlable et totale.

Le graphique 4.2 reprend les résultats de cette première simulation. On y retrouve les deux

courbes du graphique 3.6, représentant la consommation totale issue des données SCADA et la consommation non-contrôlable².

On y retrouve en plus une courbe jaune qui correspond aux résultats de la simulation. Cette courbe est la moyenne de la consommation totale des maisons et des chauffe-eaux. La courbe bleue correspond à la consommation simulée issue des chauffe-eaux. On retrouve ainsi les mêmes "patterns" que ceux du graphique 4.1.

Les résultats de cette première simulation permettent donc de confirmer le bon fonctionnement du simulateur puisque la courbe de puissance simulée est très proche de la courbe issue des données SCADA, les différences étant dues aux effets aléatoires des chaînes de Markov.

4.2 Délestage par zone

Dans ces simulations, la partie réseau de télécommunications n'est pas prise en compte.

La première tentative de contrôle du parc connecté de chauffe-eaux est une solution déjà mise en application dans certains pays. Ce contrôle consiste à délester brutalement des chauffe-eaux durant des heures prédéfinies.

4.2.1 Délestage à 1 groupe

Le délestage horaire à un groupe est un cas de contrôle de chauffe-eau déjà assez documenté dans la littérature classique (voir Callaway, 2009). Le principe est simple. Il s'agit de déterminer en début de journée des créneaux horaires pendant lesquels les chauffe-eaux n'ont pas le droit de chauffer. En dehors de ces créneaux, les chauffe-eaux fonctionnent normalement. Ainsi, en utilisant la courbe de prévision de la consommation, l'ordinateur central³ définit les périodes où la consommation d'électricité est maximale et prévoit alors les horaires de délestage. Ce contrôle peut aussi se faire de manière beaucoup plus rapide en choisissant en temps réel les moments d'arrêt et de fonctionnement du parc de chauffe-eaux. Dans ce type de contrôle, les chauffe-eaux conservent leur contrôleur thermostatique. Il est juste nécessaire d'ajouter un module supplémentaire qui vient contrôler l'alimentation générale en électricité du chauffe-eau.

2. Durant l'ensemble de ce mémoire, les couleurs des courbes sont maintenues. Ainsi, la courbe de consommation totale issue des données SCADA qui sert de courbes de référence sera toujours en verte et la courbe de résultat de simulation en jaune.

3. Dans tout ce document, l'ordinateur central désigne l'unité de calcul (serveur de la société de distribution d'électricité, par exemple) chargée de définir la commande à transmettre à l'ensemble des individus. Il peut être implémenté de multiples algorithmes qui sont décrits dans ce document (horaire de délestage, limitation de puissance, température de consigne).

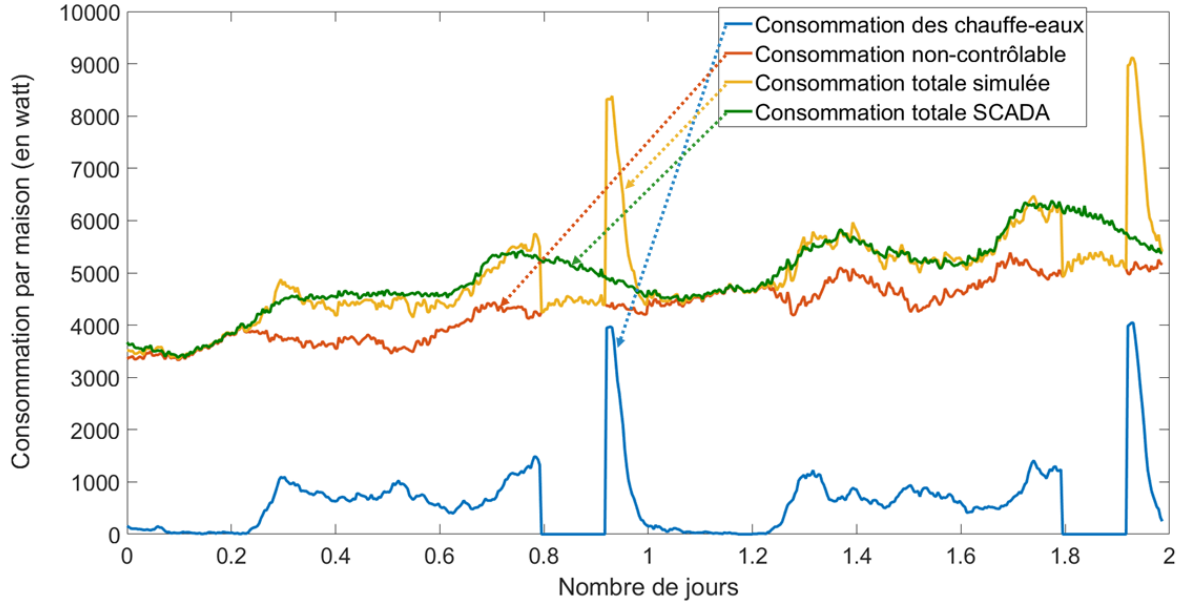


Figure 4.3 Simulation de délestage à 1 groupe entre 19h et 22h

Les résultats de la figure 4.3 montrent la consommation obtenue par maison pour un délestage à un groupe entre 19h et 22h, horaire correspondant au pic de consommation du soir. Ce que l'on remarque et qui est très bien décrit dans la littérature traitant du sujet, c'est le phénomène de *payback*. En effet, couper en alimentation les chauffe-eaux crée un "stress thermique" au niveau de leur contrôleur thermostatique. C'est à dire que la proportion de chauffe-eaux dont la température se situe sous la zone de "deadband" du contrôleur (ce qui arrive dès les premiers événements de tirage) croît asymptotiquement dès le début du délestage. Par conséquent, lorsque le parc est remis en fonctionnement, un grand nombre de chauffe-eaux vont se mettre à chauffer à leur puissance nominale (4500 watts), d'où l'apparition d'un pic de consommation à l'issue de la période de délestage. La figure 4.4 exprime le rapport de chauffe-eaux qui sont dans des situations thermiques qui entraîneront leur mise en chauffe dès la sortie de l'horaire de délestage. On peut donc facilement évaluer la charge supplémentaire liée au phénomène de "payback" par la formule suivante $P_{payback} = P_{nominale} * ratio$ avec $P_{nominale}$ qui correspond à la puissance nominale d'un chauffe-eau et $P_{payback}$ la charge moyenne par maison qui s'ajoute lors de la remise en route du parc.

Cette courbe (figure 4.4) possède 4 états distincts :

- avant 19h : c'est l'état stable pré-perturbation. C'est la fin d'après-midi, le tirage d'eau chaude (lié aux chaînes de Markov) est assez important. Il y a donc 30% des chauffe-eaux qui sont actifs.

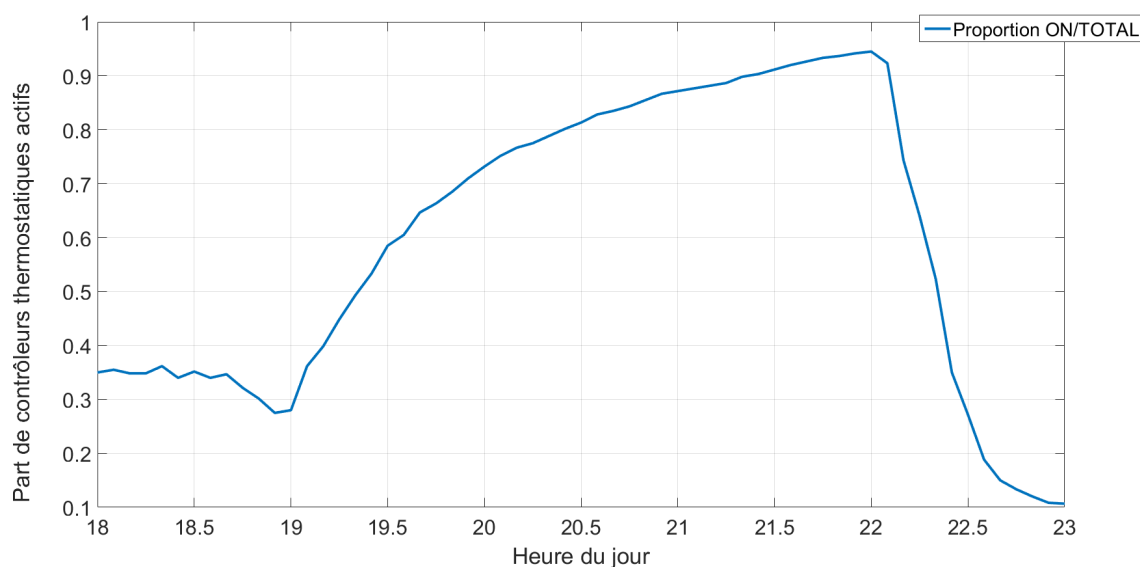


Figure 4.4 Évolution de la proportion de contrôleur thermostatique actif pendant un délestage entre 19h et 22h

- de 19h à 22h : c'est la période de délestage. La proportion de chauffe-eaux actifs croît car l'énergie injectée dans les chauffe-eaux est nulle. Cette croissance est dépendante elle-aussi de l'état du tirage actuel. Ainsi, une coupure durant la nuit aura une pente bien plus faible que sur l'heure d'un repas. On reconnaît une fonction de la forme $f(t) = 1 - e^{-kt}$ avec k un facteur lié à l'intensité du tirage et donc dépendant du temps.
- de 22h à 23h : c'est la période de reprise : à la fin de la période de délestage, les contrôleurs thermostatiques ramènent les chauffe-eaux vers un état chaud. On observe ainsi une baisse rapide de la part de chauffe-eaux actifs. Cela entraîne irrémédiablement un fort pic de consommation.
- après 23h : état stable post-perturbation : comme avant 19h, la proportion de chauffe-eaux actifs reste stable (autour de 10%) mais à une valeur plus faible qu'avant la perturbation car le tirage d'eau avant 19h est plus important qu'après 23h.

Ce graphique montre clairement comment le phénomène de payback dans un parc de chauffe-eaux avec contrôleur thermostatique peut se mettre en place.

Cette courbe de récupération dépendra du moment où l'interruption est faite, et de la distribution initiale des températures dans le parc (voir Laurent and Malhamé, 1994).

Il est important de noter que la puissance nominale de chaque chauffe-eau est du même ordre de grandeur que la charge moyenne d'une maison (quelques kilowatts). Il est donc capital

d'éviter une synchronisation des chauffe-eaux dans leur fonctionnement thermostatique.

Enfin, on retrouve aussi ce phénomène de payback lors de pannes de courant (black-out). La dynamique est alors exactement la même. Lors de la remise sous tension du réseau, on observe une surconsommation d'énergie due au chauffe-eau (cet aspect sera traité plus spécifiquement dans la section 5.1). Le terme "Cold Load Pickup" est utilisé en anglais pour décrire ce phénomène.

Afin de résoudre le problème de la synchronisation des chauffe-eaux entre eux et du phénomène de payback, un deuxième type de délestage a été mis en place. Celui-ci répartit les chauffe-eaux en N groupes de taille identique.

4.2.2 Délestage à N groupes

L'idée principale d'un délestage à N groupes est de créer de la diversité dans les profils de chauffe-eaux et ainsi de ne pas avoir les reprises en charge des chauffe-eaux en simultané (Ericson, 2009; Laurent et al., 1995). Le but est de compenser la reprise en charge d'un groupe de chauffe-eaux avec le délestage d'un autre groupe.

La difficulté devient alors de définir les horaires de délestage pour les N groupes de chauffe-eaux. Un algorithme présenté ci-dessus a été mis en place pour automatiser la création de ces horaires. Les critères auxquels doit répondre cet algorithme sont les suivants :

- Afficher des résultats clairs et lisibles : langage humain ;
- Utiliser les prédictions quotidiennes de la consommation totale et de la consommation non-contrôlable ;
- Calculer à minuit les horaires de délestage pour toute la journée ;
- Respecter l'égalité de délestage des groupes (aucun groupe ne doit être lésé par rapport à un autre) ;
- Respecter un temps minimum entre deux instructions (délestage ou reprise) ;
- Utiliser comme trajectoire optimale la moyenne glissante sur 12 heures de la prévision de la consommation totale.

Dans cette étude, il est supposé que la prédiction de consommation est parfaite et correspond à la consommation totale issue des données SCADA (courbe verte de la figure 3.6).

L'algorithme utilisé suit les étapes suivantes :

- Distribuer aléatoirement l'ensemble des chauffe-eaux en N groupes de taille identique (si non déjà réalisé) ;
- Pour chaque pas de temps (chaque instant, dans le cas d'une fonction continue), on définit une valeur $Rap(t)$ définit ainsi :

- $Rap(t) = 0$ si la puissance non-contrôlable est supérieure à la trajectoire (puissance) optimale ;
- $Rap(t) = 1 + (1 - \frac{P_{totale}}{P_{optimale}})$ si la puissance totale est inférieure à la puissance optimale ;
- $Rap(t) = \frac{P_{optimale} - P_{nonContrôlable}}{P_{totale} - P_{nonContrôlable}}$ si la puissance optimale se situe entre la puissance non-contrôlable et la puissance totale ;
- Lissage de la fonction $Rap(t)$ à l'aide d'une moyenne glissante de 25 minutes ;
- Détection des creux de consommation (en vu d'une optimisation future) ;
- À partir de la fonction Rap , création des horaires de délestage en respectant les caractéristiques suivantes :
 - En tout temps, le ratio : $\frac{GroupeEnFonctionnement}{N}$ doit être inférieur ou égal à Rap ;
 - Si ce ratio est supérieur à Rap , mettre des groupes en délestage jusqu'à ce que ce ratio devienne égal à Rap ;
 - Si ce ratio est inférieur, remettre le groupe le plus ancien en marche en respectant un écart minimum entre deux reprises de groupes pour que les effets de payback ne s'additionnent pas ;
- À partir des creux de consommation détectés précédemment, modifier les créneaux horaires pour répartir les reprises en charge sur la durée des creux de consommation en prenant en compte la durée d'extinction des groupes pour évaluer l'ampleur du payback ;
- Générer les horaires de délestage de manière lisible humainement (voir résultat 4.5).

Cet algorithme totalement autonome permet entre autres d'étudier la variation de N (le nombre de groupes) sur la capacité de lissage de la charge.

La figure 4.5 montre le type de résultats générés pour $N = 5$ et un écart entre deux reprises en charge de 1 heure. On remarque le délestage des groupes pendant les pic de consommation du matin et du soir.

Les trois graphiques suivants représentent les résultats d'un contrôle à N groupes avec N valant respectivement 10 (fig 4.6), 50 (fig 4.7) et 200 (fig 4.8).

On remarque la capacité réelle de cette approche à réduire significativement les pics de consommation, comme celui de la troisième journée, qui est réduit de 600 watts par maison. Les performances durant la première journée sont aussi intéressantes puisque la courbe jaune (résultat de la simulation et donc du contrôle par délestage) est très proche de la courbe violette (fonction optimale par moyenne glissante).

En augmentant le nombre de groupes de maisons (noté N dans ce document), le "bruit"⁴ est

4. Ce "bruit" est en réalité composé d'une multitude de pics de reprise (payback) liés à chaque groupe.

```

Console  Javadoc  Search  Progress

<terminated> test [Java Application] /local/bourbeno/Logiciel/jdk1.7
First line
0:0;1:0//1:45;3:45//3:55;12:50
0:0;2:45//3:55;13:50//16:20;21:30
1:45;9:50//16:30;22:30
1:45;10:50//16:40;23:30
1:45;11:50

```

Figure 4.5 Résultat d'une optimisation par délestage à 5 groupes

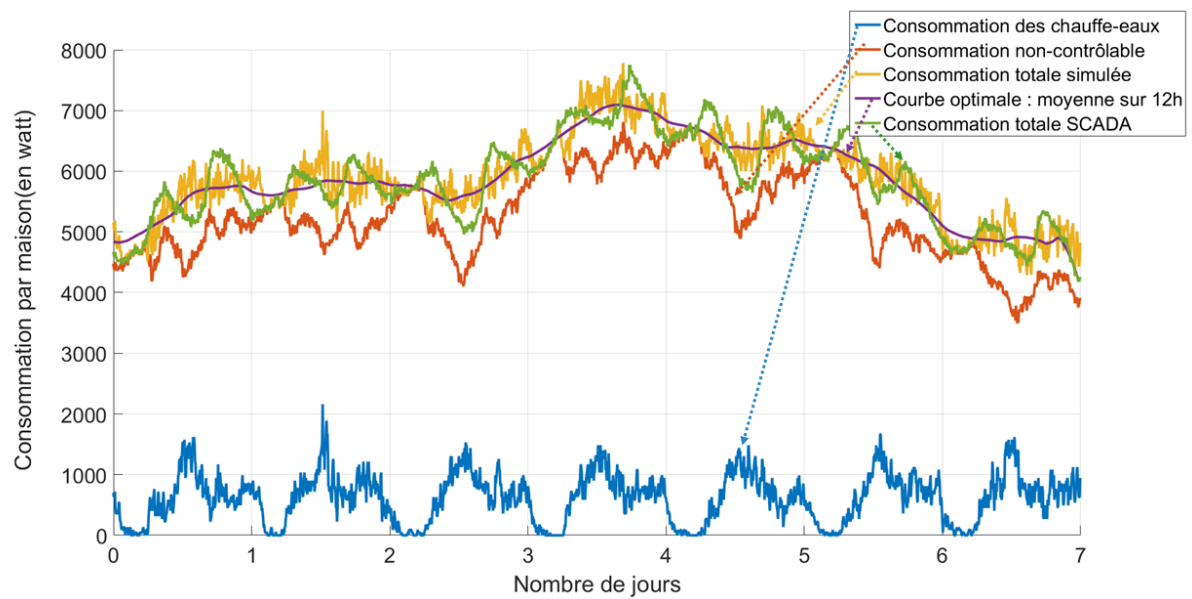


Figure 4.6 Simulation avec contrôle par délestage à 10 groupes sur une population de 100 maisons.

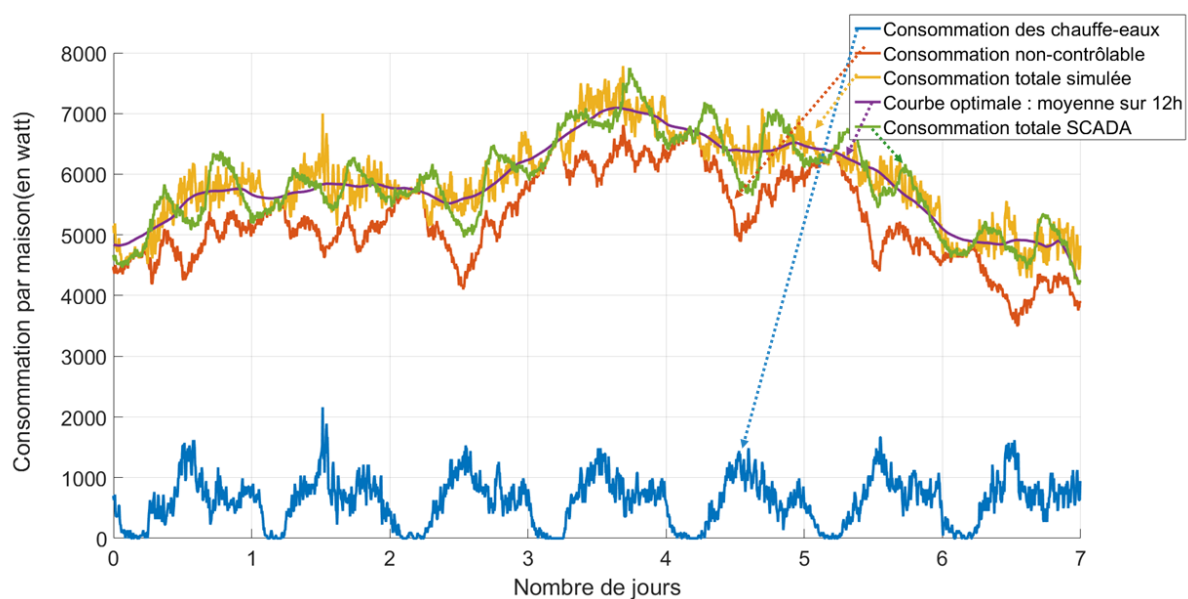


Figure 4.7 Simulation avec contrôle par délestage à 50 groupes sur une population de 500 maisons.

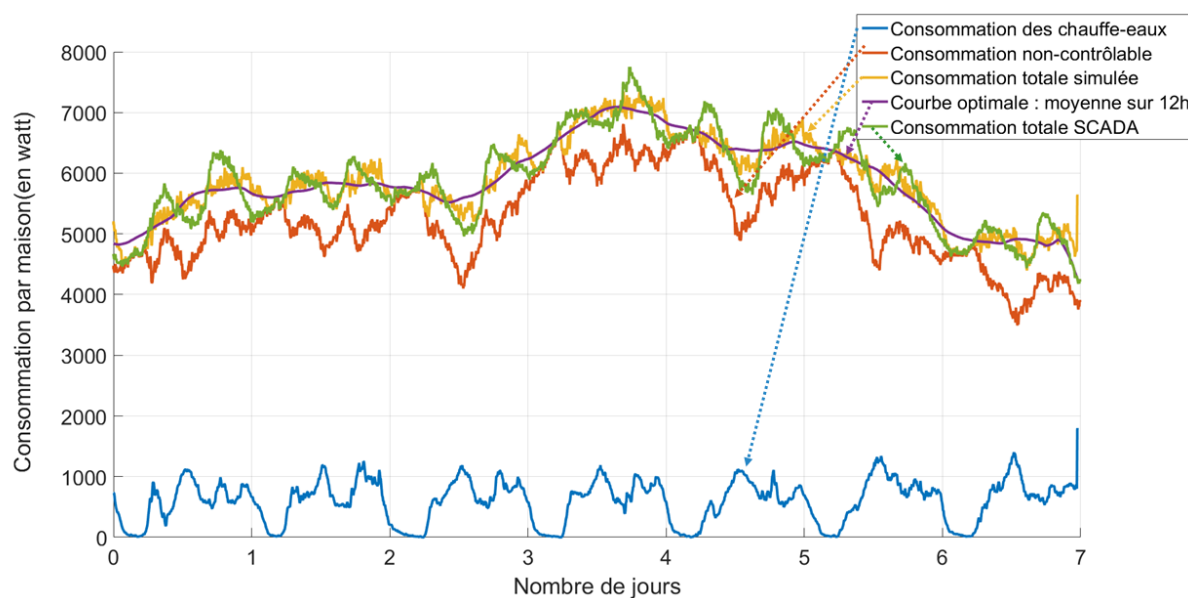


Figure 4.8 Simulation avec contrôle par délestage à 200 groupes sur une population de 4000 maisons.

diminué. Les courbes bleues sur les graphiques 4.6, 4.7 et 4.8 qui représentent la consommation moyenne d'un chauffe-eau du parc contrôlé, montrent bien ce "lissage" effectif du bruit.

Cependant, si le contrôle à N groupes présente des performances relativement bonnes pour la réduction de pointe (comme le montre le graphique 4.8), la gestion post-pointe est elle beaucoup plus complexe. Après un pic, lorsque la courbe verte passe sous la courbe violette, le contrôle par délestage peine à suivre la trajectoire optimale. Le plus souvent, la reprise est trop forte au début du creux de consommation, puis trop faible ensuite. Ce phénomène est clairement visible entre la journée 2 et la journée 3 sur la figure 4.8. Un nouveau pic apparaît au début de la zone de reprise.

Ce phénomène de reprise rend le contrôle par délestage à N groupes très sensible et instable, en particulier à cause du fonctionnement ON/OFF du contrôleur thermostatique : soit le chauffe-eau consomme 4500 watts, soit il ne consomme rien.

C'est pourquoi, il paraît intéressant d'étudier le contrôle centralisé des chauffe-eaux en utilisant l'intégralité de l'intervalle de puissance allant de 0 à 4500 watts. Techniquement, cela peut se traduire par l'ajout d'un module PWM au niveau de l'alimentation des résistances en électricité.

4.3 Commande en modulation de puissance

Dans ces simulations, la partie réseau de télécommunications n'est pas prise en compte.

4.3.1 Sans ajustement thermique

La première méthode mise en place dans ce paragraphe consiste à moduler simplement la puissance injectée dans les chauffe-eaux afin qu'elle soit identique à celle souhaitée.

Ainsi, pour chaque instant, l'écart entre la courbe non-contrôlable et la courbe optimale est mesuré, et cette puissance devient alors la puissance injectée dans les chauffe-eaux. Pour éviter tout risque de surchauffe, le contrôleur thermostatique est conservé pour couper l'apport en énergie du chauffe-eau lorsque celui-ci atteint une température de 60 °C. Cela permet d'assurer la sécurité des biens et des personnes.

Dans le cas où la puissance optimale est inférieure à la puissance non-contrôlable (voir section 3.6.1), alors la puissance envoyée aux chauffe-eaux est nulle. Il n'existe pas dans ce

Ainsi en augmentant le nombre de groupes, l'amplitude des pics est diminuée par dilution dans la charge globale et leur fréquence augmentée. Il y a un plus grand nombre de pics moins importants, la charge globale s'en retrouve ainsi lissée.

premier contrôle de mécanisme s'assurant que la température des chauffe-eaux ne descende pas sous la limite inférieure.

Dans cette première simulation, tous les jours à minuit, l'optimisateur reçoit l'estimation de consommation non-contrôlable et la courbe optimale pour la journée à venir et détermine la puissance que les chauffe-eaux ont "le droit" de consommer. Cette commande en puissance est transmise à l'ensemble de la population qui l'utilise durant toute la journée. Comme pour le délestage, on suppose que les prédictions de consommation sont parfaites (et donc égales aux données SCADA).

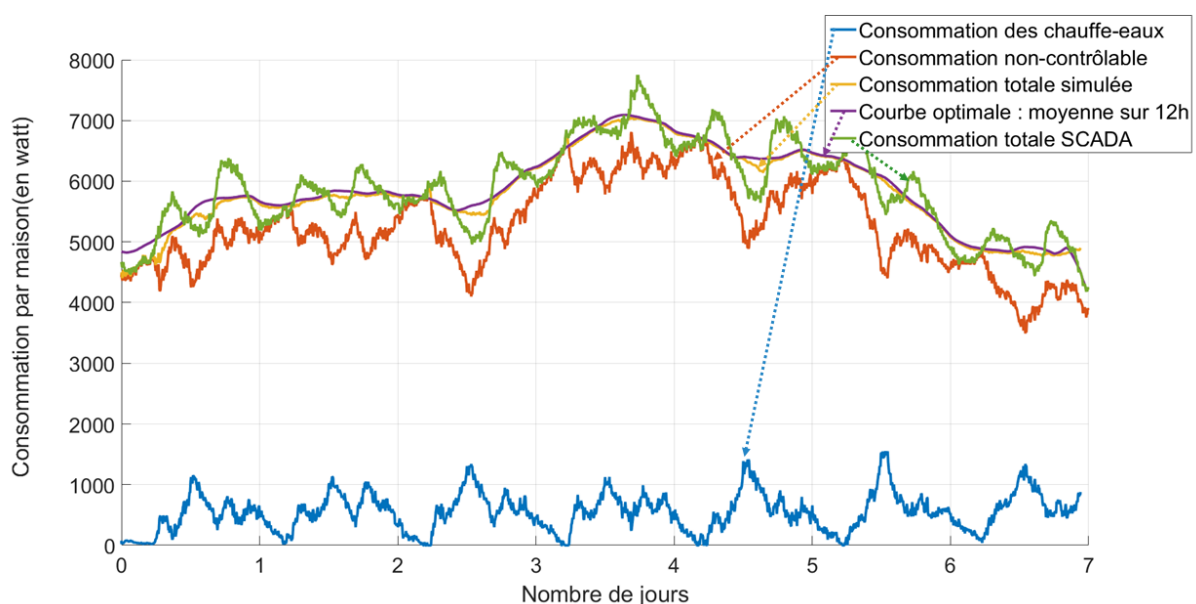


Figure 4.9 Simulation avec contrôle par limitation de puissance simple sur 500 maisons.

Le graphique 4.9 donne les résultats d'un contrôle en puissance simple. Le premier constat est une très bonne correspondance entre le résultat de la simulation et la courbe optimale. Presque tout le temps, la consommation des maisons contrôlées est identique à la commande souhaitée.

Cependant, des baisses de charge peuvent être régulièrement détectées. Cela est dû à la présence de contrôleur thermostatique en plus du contrôleur de puissance. Ainsi, alors que la commande idéale moyenne est attribuée à l'ensemble des chauffe-eaux, certains qui ont atteint une température interne supérieure à 60°C voient leur alimentation interrompue par le contrôleur thermostatique. Ainsi, leur charge sur le réseau devient nulle et la charge moyenne sur l'ensemble des maisons devient alors plus faible que celle souhaitée. C'est ce phénomène qui peut être observé au milieu des journées 2 et 4.

Cependant, puisque la courbe violette optimale conserve l'énergie, cela signifie intrinsèque-

ment que ce contrôle en puissance simple diminue la consommation globale d'énergie. Autrement dit, certains individus du parc ont de l'eau froide. On a vu que certains chauffe-eaux ayant peu de tirage d'eau atteignent leur température maximale avec la puissance que le contrôle leur fournit, et donc désactivent le chauffage. Inversement, pour d'autres chauffe-eaux ayant un tirage d'eau bien plus intense, la puissance fournie par le contrôleur est bien trop faible et leur température interne chute.

Ainsi, pour mieux comprendre le fonctionnement de ce système, deux outils sont introduits :

- **La représentation graphique de la distribution thermique des chauffe-eaux** (Voir figure 4.10) : Sur ce graphique, 5 courbes sont représentées. Chacune d'elles représente la température interne d'un décile ou d'un quart de la population. Ainsi, la courbe supérieure indique que 10% de la population se situe au-dessus de cette courbe. La courbe identifiée "25%" indique que un quart des chauffe-eaux sont au-dessus de cette courbe. La courbe identifiée "50%" représente la médiane de la population. La courbe identifiée "90%" indique que 10% de la population est plus froide que la courbe. Ainsi, en plus de proposer des bornes de température pour la population de chauffe-eaux contrôlés, cette représentation graphique donne une vision simple et immédiate de la distribution thermique du parc, à l'image d'une courbe de distribution statistique.
- **La probabilité d'insatisfaction** : afin de s'assurer que les utilisateurs ne soient pas perturbés par le contrôle et la commande des chauffe-eaux, un outil de détection des utilisateurs insatisfaits est mis en place. Lorsque la température de la couche supérieure d'un chauffe-eau⁵ descend sous les 45°C alors une exception est déclarée au sein du simulateur jusqu'à ce que la température repasse au-dessus des 45°C. Ainsi, en agrégeant l'ensemble des exceptions, on peut déterminer la proportion (en moyenne) d'individus ayant une température d'eau chaude sous 45°C.

Ainsi, pour le contrôle en puissance simple, on obtient un taux d'insatisfaction égal à 0.34%. C'est à dire qu'en moyenne, à chaque instant, 0.34% de la population a un tirage d'eau chaude inférieure à 45°C. Si l'on veut obtenir une qualité de service de haut niveau pour les clients, ce taux d'insatisfaction doit être le plus faible possible. Une version améliorée de ce contrôle en puissance a été développée afin de diminuer ce taux.

Le graphique 4.10 montre que pour ce contrôle, 4 jours sont nécessaires pour atteindre le régime permanent de la distribution thermique. En analysant la courbe de la distribution thermique, il apparaît des "zones" de températures dans lesquelles chacune des courbes est astreinte. On peut donc, dans une première approximation, établir une correspondance entre la température moyenne d'un chauffe-eau et sa position relative dans la distribution ther-

5. La prise d'eau chaude est effectuée en haut du ballon d'eau chaude afin de respecter la dynamique de l'eau qui engendre une stratification des températures dans le chauffe-eau.

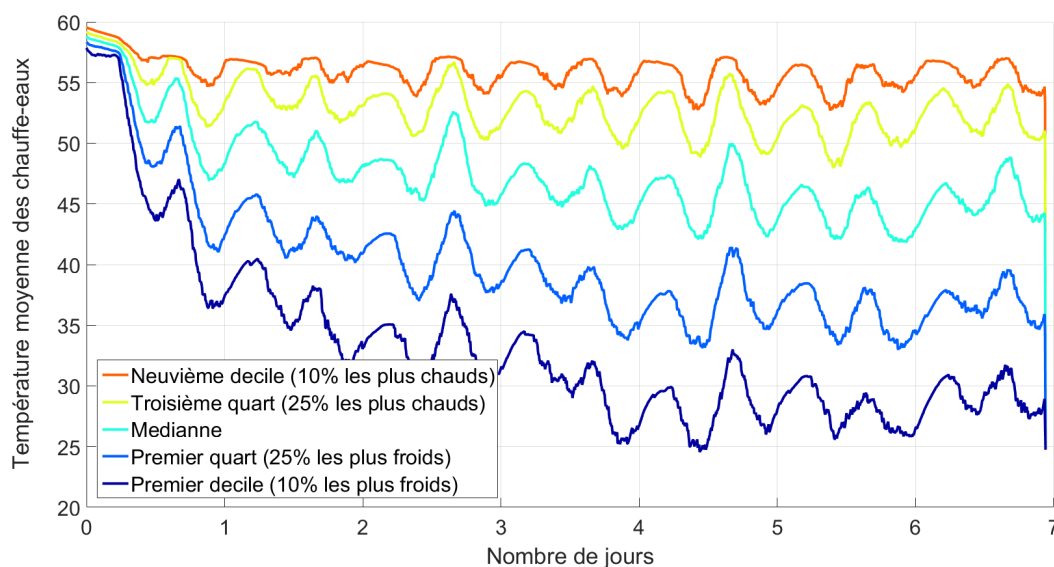


Figure 4.10 Distribution thermique de la population avec contrôle par limitation de puissance simple sur 500 maisons.

mique de la population.

À partir du graphique 4.10, il est possible de constater qu'un chauffe-eau ayant une température de 33°C se situe entre le premier décile et le premier quart. En revanche un chauffe-eau à 57°C est dans le décile le plus chaud de la population.

Il est important de noter qu'ici, c'est la température moyenne des chauffe-eaux qui est étudiée et non la température de sortie. Ainsi, grâce au phénomène de stratification de l'eau (voir section 3.2, un chauffe-eau avec une température moyenne de 35°C peut avoir une température de sortie d'eau chaude supérieur à 45°C.

Finalement, afin de résoudre ce problème de chauffe-eaux en dehors de la zone de confort, une deuxième version du contrôle a été conçue sur un principe de réajustement de la puissance en fonction de la température.

4.3.2 Avec ajustement thermique

Le principe lié à cette nouvelle version consiste à prendre de la puissance aux chauffe-eaux les plus chauds pour la redistribuer aux chauffe-eaux les plus froids.

Dans une première approximation, la distribution thermique de la population peut être considérée comme constante au cours du temps ; c'est à dire que les courbes du graphique 4.10 sont considérées comme des droites horizontales. Des "zones" vont donc être définies à partir

du graphique 4.10. En fonction de la température interne de chaque chauffe-eau, la consigne de puissance sera ajustée suivant une règle définie à l'avance. Cette "règle" est définie de manière à s'assurer que le supplément de puissance attribué aux chauffe-eaux les plus froids est compensé dans des proportions identiques par une diminution de la puissance des chauffe-eaux les plus chauds. Le but de cette règle est d'avoir toujours la même puissance consommée avant et après redistribution.

Le tableau 4.1 présente le facteur appliqué à la puissance de consigne en fonction de la température interne du chauffe-eau.

Tableau 4.1 Facteur d'ajustement de la puissance en fonction de la température.

Intervalle de température	Facteur de correction de puissance	Part de la population (approx.)	Gain/Perte de puissance
>55 °C	$f = 0.0$	10%	+10%
53 °C à 55 °C	$f = 0.5$	15%	+7.5%
45 °C à 53 °C	$f = 0.8$	25%	+5%
30 °C à 45 °C	$f = 1.2$	35%	-7.5%
<30 °C	$f = 2.0$	15%	-15%

Ces facteurs sont définis *à la main* et en supposant que la distribution n'est que faiblement changée après redistribution.

Une version bien plus précise pourrait être réalisée automatiquement en utilisant la fonction de répartition de la population à partir de la courbe de distribution.

La consigne émise par l'ordinateur central reste identique et unique pour l'ensemble de la population. Cependant, cette consigne est modifiée et personnalisée en fonction de l'état thermique du chauffe-eau. Ainsi, en appliquant cette redistribution de puissance à l'ensemble de la population, le graphique 4.11 montre des résultats bien plus performants que ceux obtenus sans redistribution. En effet, avant redistribution, les chauffe-eaux au-dessus de 55°C pouvaient se voir attribuer une puissance sans qu'elle ne soit réellement utilisée puisque leur contrôleur thermostatique n'était pas sur ON. Grâce à la redistribution, ce cas n'est plus possible puisque ces chauffe-eaux se voient attribuer dans tous les cas une puissance nulle.

Le fonctionnement en puissance se trouve ainsi nettement amélioré et de surcroît, une baisse de la population insatisfaite est aussi constatée. Le taux moyen de clients insatisfaits passe ainsi de 0.34% à 0.1% ce qui est très acceptable.

Il est important de noter que la distribution thermique n'est que très peu modifiée par rapport à celle d'un contrôle par limitation sans redistribution (voir graphique 4.10 et 4.12). Cela permet de confirmer le fait que la redistribution de puissance est effectivement un jeu

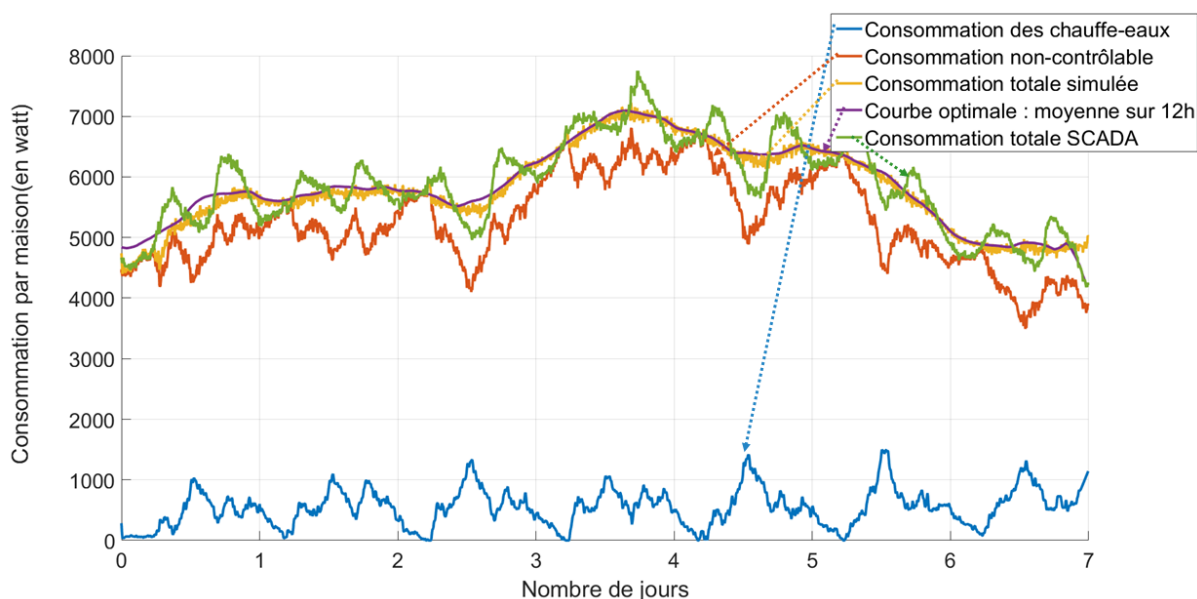


Figure 4.11 Simulation avec contrôle par limitation de puissance avec redistribution sur 500 maisons.

à somme nulle (l'augmentation de puissance des plus froids est compensée par une baisse de puissance des plus chauds). En effet, les hypothèses de gains et de pertes de puissance avaient été établies pour la distribution thermique précédente (voir tableau 4.1). Puisque la distribution thermique n'évolue que très peu entre les deux simulations, les hypothèses demeurent valides.

En donnant la possibilité aux chauffe-eaux les plus froids de consommer plus, le nombre d'utilisateurs insatisfaits a été divisé d'un facteur 3.

4.3.3 Avec ajustement thermique d'urgence

Dans une recherche de diminution du taux d'insatisfaction, une troisième méthode de redistribution a été mise en place.

Un chauffe-eau est dit dans un "état critique" quand la température de sa couche supérieure est inférieure à 49°C, i.e. quand le risque d'avoir un usager insatisfait est très grand. Les simulations précédentes ont montré que le taux d'utilisateurs mécontents est très faible (inférieur à 0.1%). Donc il est possible d'émettre l'hypothèse que le nombre de chauffe-eaux dans un état critique est lui aussi faible devant le nombre total de chauffe-eaux.

Ainsi en autorisant ces chauffe-eaux critiques à utiliser leur puissance nominale (4500 watts ici) pour réchauffer en urgence les couches supérieures, le taux d'insatisfaits est réduit tout

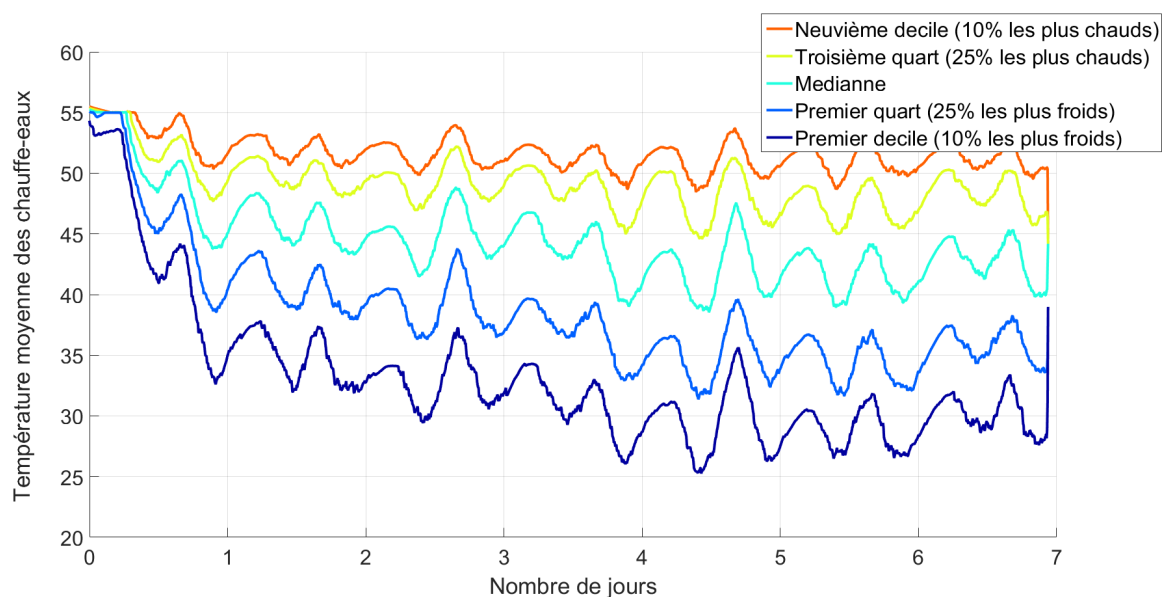


Figure 4.12 Distribution thermique de la population avec contrôle par limitation de puissance avec redistribution sur 500 maisons.

en maintenant de bons résultats en terme de contrôle de la charge.

Le graphique 4.13 montre le bon comportement de la charge contrôlable malgré la possibilité pour les chauffe-eaux critiques d'utiliser 100% de leur puissance nominale. Cela confirme bien l'hypothèse que la participation de ces chauffe-eaux critiques est minime au regard de la charge totale. De plus, le taux d'insatisfait passe ainsi de 0.1% avec une redistribution simple à 0.024%, soit un facteur 4 de réduction.

Le contrôle en puissance tel que réalisé ici ne permet pas une utilisation à grande échelle puisqu'il est basé sur une courbe d'optimisation à 12 heures glissantes. Ainsi, les besoins énergétiques des chauffe-eaux sont évalués uniquement à partir de la courbe de prédiction de la consommation totale. Or lorsque l'on vient contrôler des chauffe-eaux à grande échelle, on vient modifier cette prédiction et donc modifier aussi la manière de prédire la consommation future. De plus, le contrôle se fait sur l'énergie injectée et non sur la température interne. Ainsi les écarts de prédiction de demande s'accumulent et deviennent un phénomène divergent. Si la prédiction fait une erreur de -10% sur le besoin énergétique des chauffe-eaux, la population va se refroidir jusqu'à atteindre un niveau critique où elle utilisera la puissance nominale d'urgence, réalisant finalement une sorte de contrôle thermostatique.

Ainsi, les erreurs de prédiction de consommation viennent modifier la distribution thermique des chauffe-eaux et donc rendre le système inopérant. En effet, ce contrôle en puissance ne réactualise pas la distribution thermique de la population et est donc limité dans ses capacités

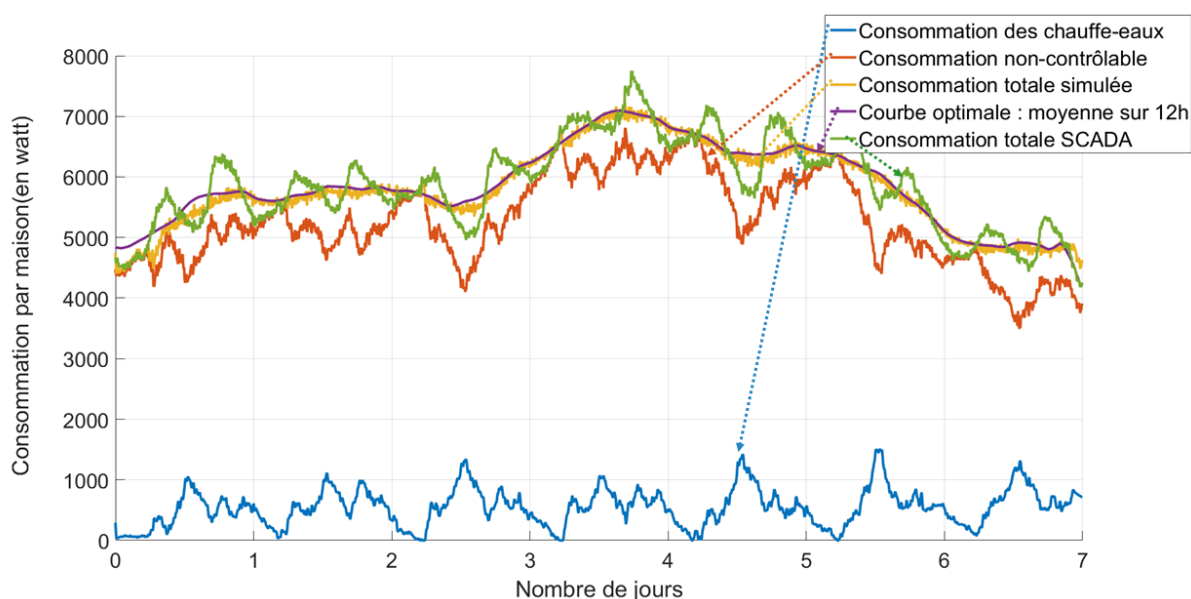


Figure 4.13 Simulation avec contrôle par limitation de puissance avec redistribution et état critique sur 4000 maisons.

de redistribution. La mise en place d'un processus de "feedback" sur la température des chauffe-eaux permettrait d'obtenir une distribution thermique de la population en temps réel mais implique une charge importante en terme de télécommunications. Enfin, le contrôle en puissance ne permet pas, dans les conditions actuelles de développement, une différenciation des différents types de chauffe-eaux (en capacité, en puissance, en taille, etc...).

C'est pourquoi un nouveau type de contrôle basé sur la théorie des jeux à champ moyen a été développé.

4.4 Contrôle en champ moyen

4.4.1 Avec une optimisation déterministe

Dans cette première partie, l'optimisation déterministe de la consommation sera présentée. La prédiction de la consommation non-contrôlable est donc toujours supposée parfaite et unique. Ce choix permet d'avoir une répétabilité des optimisations réalisées et des résultats en opposition à une optimisation stochastique qui, par essence, est basée sur un ensemble de processus aléatoires.

Ainsi, les simulations sont organisées suivant la logique suivante (expliquée plus spécifiquement dans le chapitre 3) :

- Un quart d'heure avant minuit, l'optimisateur global génère 24 températures de consigne

communiquées via le système de télécommunication à l'ensemble de la population (voir section 3.5) ainsi que la température moyenne du parc.

- À minuit, le contrôleur champ moyen de chaque chauffe-eau analyse la consigne et génère une ligne de conduite pour les 24 prochaines heures.
- À chaque pas de temps de la simulation (5 minutes, ici) le contrôleur champ moyen de chaque chauffe-eau détermine la puissance à injecter en fonction de la ligne de conduite, de la température de chaque couche du chauffe-eau et du tirage d'eau en cours. La consigne horaire est convertie en consigne au quart d'heure selon une interpolation linéaire, de telle façon que la température moyenne du parc de chauffe-eaux atteigne la valeur de consigne à la fin de l'heure.
- Éventuellement (suivant un tirage de Poisson), le contrôle du chauffe-eau transmet à l'ordinateur central sa température moyenne interne (en moyenne 4 fois par jour) via le système de télécommunications afin de mettre à jour l'estimation de la température moyenne du parc (voir section 4.4.4).
- Le reste du simulateur fonctionne de manière identique (agrégation des flux électriques, génération de la consommation non-contrôlable, etc...).

Pour présenter les résultats de ce type de simulation en champ moyen, un nouveau type de graphique est utilisé (voir figure 4.14). Il représente sur un même schéma la consigne heure par heure en rouge et la température moyenne de la population en bleue (toutes les 5 minutes).

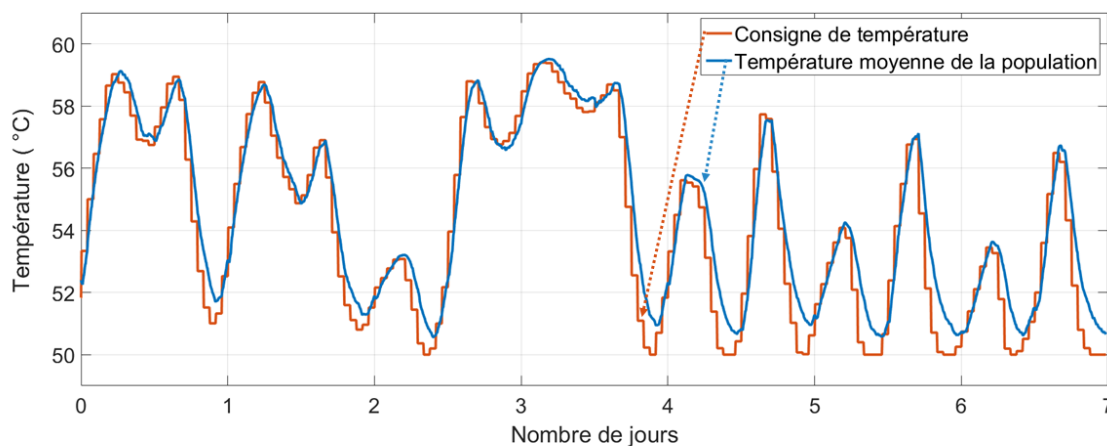


Figure 4.14 Évolution de la température moyenne de la population avec un contrôle champ moyen sur 400 maisons.

Ce graphique montre la très bonne capacité des contrôleurs champ-moyen à suivre la consigne en température lorsque la variation de température est positive (période de mise en charge du parc). En revanche, un décrochage entre les deux courbes s'opère lorsque la température moyenne baisse et qu'elle passe sous les 52°C. Ce décrochage s'explique de deux manières distinctes :

- L'optimisateur central considère en tout temps une distribution normale de la population de chauffe-eaux autour de la température moyenne. Or si cette approximation est valable dans le domaine [52; 58]°C, elle ne l'est plus à proximité des bornes 50 et 60°C. En effet, les contrôleurs champ moyen s'interdisent les zones de température au dessus de 60°C et au dessous de 50°C. Ainsi, autour de ses valeurs, une déformation de la gaussienne s'observe. Elle vient "s'écraser" contre ces deux bornes. Alors, les prévisions que l'optimisateur central réalisent sur le comportement du parc sont erronées. Ce décrochage est donc observé et se traduit irrémédiablement par un écart au niveau de la charge.
- Ce décrochage n'est observé qu'en période de refroidissement du parc de chauffe-eaux. En effet, la manière dont on conduit la température moyenne du parc est fondamentalement différente si la variation de température est positive ou négative. Dans le cas d'une augmentation de température, celle-ci est réalisée à l'aide d'un ajustement de la puissance transmise aux éléments chauffants. La chaîne [optimisateur central - contrôleur champ moyen local] est pleinement maîtresse du contrôle appliqué. En revanche, lors d'une baisse de température, celle-ci est conduite par le tirage d'eau froide, et donc par un processus stochastique. Le système a donc un contrôle beaucoup moins direct et complet de la population.

Il est intéressant maintenant d'étudier les courbes thermiques du graphique 4.14 avec celles des puissances du graphique 4.15

La prévision de puissance (courbe rouge sur la figure 4.15) est générée par l'optimisateur central. Elle correspond à la partie contrôlable de la charge optimale. Si les chauffe-eaux suivent exactement cette courbe de prévision de puissance, alors la charge de la population est égale à la trajectoire optimale déterminée par l'optimisateur. Il est important de noter que cette puissance est générée en interne par l'ordinateur central et n'est jamais transmise aux chauffe-eaux. La commande transmise est ici exclusivement thermique.

Il est notable ici de voir la bonne correspondance entre la prévision de charge et la charge réelle liée aux chauffe-eaux (courbe bleue). On note quelques décrochages (par exemple à la fin de la 5^{ème} journée) qui sont liés à la résorption de l'écart de température entre consigne et réalité (voir graphique 4.14). Lorsque le parc de chauffe-eaux doit accroître sa température, cela se traduit par une remise en charge du parc. Or si la température réelle est supérieure à

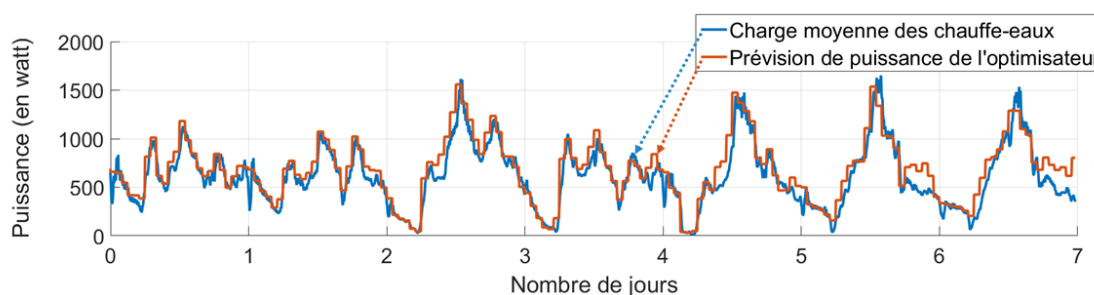


Figure 4.15 Évolution de la charge (puissance) moyenne de la population avec un contrôle champ moyen sur 400 maisons.

la température de consigne, le système ne réagit pas à cette reprise tant que cette consigne reste inférieure.

On peut finalement conclure cette première étude sur un contrôle en champ moyen avec la courbe globale de la charge (voir graphique 4.16).

Ce type de contrôle en champ-moyen montre sa capacité à réduire à la fois les pics et les creux de consommation. La courbe jaune, résultat de la simulation, est proche de la courbe optimale violette. Un fonctionnement par plateau pour la charge est observé tout au long de ces 7 jours. Les "micro-vibrations" qui sont observées au niveau de la courbe totale simulée et de la courbe optimale sont dues au fait que l'optimisation se fait heure par heure alors que la puissance varie aux 5 minutes. Le champ-moyen, dans cette optique, n'a pas vocation à réguler les micro transitions de charge mais de gérer la puissance sur une échelle de temps plus importante (quelques heures à quelques jours).

Ainsi, avec la commande à champ moyen, le pic hivernal 2013/2014 qui a lieu durant la 3^{ème} journée, présente une réduction de 800 watts par maison (de 7800W à 7000W), soit 10% de réduction du pic.

La suite de cette section présente en profondeur des résultats plus spécifiques de cette étude.

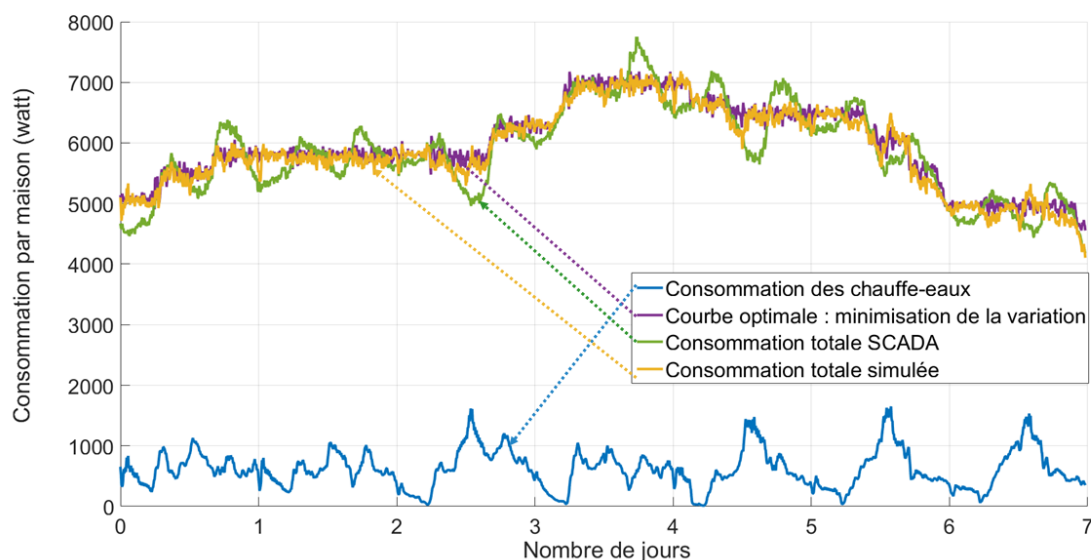


Figure 4.16 Simulation d'un contrôle déterministe en champ moyen sur un parc de 400 maisons.

4.4.2 Étude de la distribution thermique : équité entre les chauffe-eaux

Tel que présenté à la section 3.4, un des buts recherchés dans le contrôle en champ moyen est la particularisation d'une commande commune pour chaque chauffe-eau en fonction de ses besoins propres, et cela, en respectant une notion d'équité dans le parc contrôlé. Le contrôle en champ moyen cherche aussi à minimiser sa perturbation sur la distribution thermique des chauffe-eaux, en évitant par exemple d'amener l'ensemble de la population à la même température. Autrement dit, le but est de garder en tout temps une variance significative. L'intérêt est d'éviter les effets de synchronisation des chauffe-eaux que l'on peut observer dans un contrôle en délestage horaire (voir section 4.2).

Sur le graphique 4.17 qui représente la distribution thermique de la population durant les 7 jours de contrôle en champ moyen, on peut remarquer que la variance de la population reste toujours significative. La population de chauffe-eaux se distribue toujours de part et d'autre de la consigne. En comparaison avec la figure 4.12, la variance de la population est bien plus faible dans le cas du contrôle champ-moyen. De plus, la courbe des 10% des plus froids (en bleu foncé) ne passe jamais sous la barre des 48°C pour le contrôle champ-moyen alors qu'elle passe fréquemment sous les 30°C pour le contrôle à limitation de puissance. On a donc, pour le contrôle à champ moyen, une population plus "thermiquement concentrée" et plus chaude.

De même, le champ moyen offre un taux d'insatisfaction statistiquement nul sur les 8 jours de simulation réalisés, i.e. aucun chauffe-eau a fourni de l'eau chaude à une température

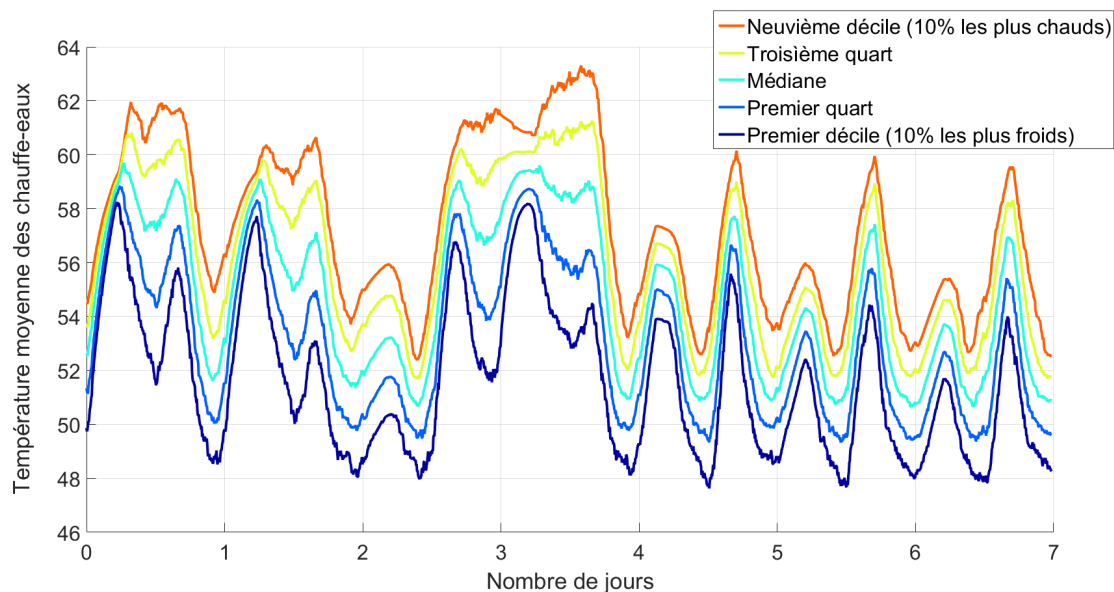


Figure 4.17 Distribution thermique d'un parc de 400 chauffe-eaux avec un contrôle déterministe en champ moyen.

inférieur à 45°C .

De plus, le graphique met en lumière la compétition entre deux "forces" :

- la première qui tend à réduire la variance (en rapprochant les courbes de température). Elle correspond aux phases de chauffage du parc. Lorsque le parc monte en température, la commande qui est donnée a pour effet de concentrer la distribution autour de la consigne.
- la deuxième qui tend à augmenter la variance. Elle correspond aux phases de décharge du parc, lorsque la température moyenne est amenée à diminuer. Comme vu précédemment, la baisse de la température des chauffe-eaux est conduite par les tirages d'eau, processus aléatoire. C'est donc naturellement que ce processus augmente la variance de la population.

Finalement, cette compétition entre ces deux manières de "conduire" le parc de chauffe-eaux donne une stabilité dans la distribution thermique des chauffe-eaux.

Le graphique 4.18 montre à la fois le premier et dernier décile de la population mais aussi la trajectoire de 3 chauffe-eaux choisis aléatoirement dans la population. Il permet de mettre en valeur le critère d'équité du contrôle en champ-moyen. En effet, en regardant plus spécifiquement le chauffe-eau 3 (en vert), il apparaît qu'au moment 2.7 jours, il fait partir des chauffe-eaux les plus froids, puis au moment 4.5 jours, il fait partie des chauffe-eaux les plus chauds.

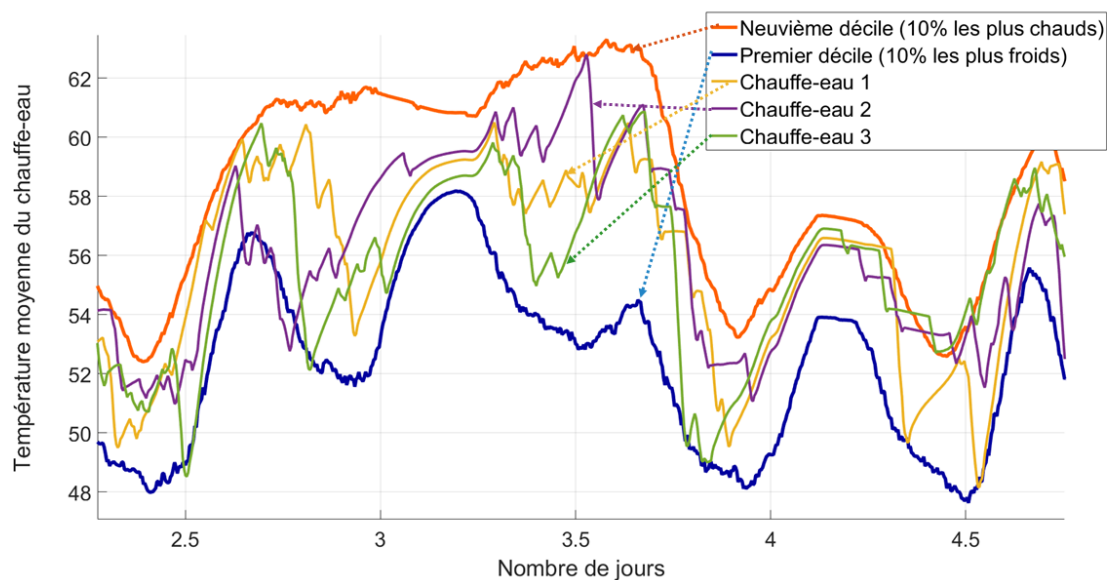


Figure 4.18 Parcours individuels de 3 chauffe-eaux durant une simulation avec contrôle en champ moyen.

Ainsi, on remarque que malgré une moyenne et une distribution thermique qui évoluent lentement, la position de chaque chauffe-eau individuellement au sein de cette distribution change très régulièrement. Ce comportement des chauffe-eaux au sein du champ moyen pourrait être comparé avec un essaim d'étourneaux en vol. La position de chaque étourneau au sein de l'essaim varie constamment, aléatoirement et rapidement, mais l'essaim en lui-même reste stable et semble muni d'une volonté propre (vitesse et mouvements cohérents).

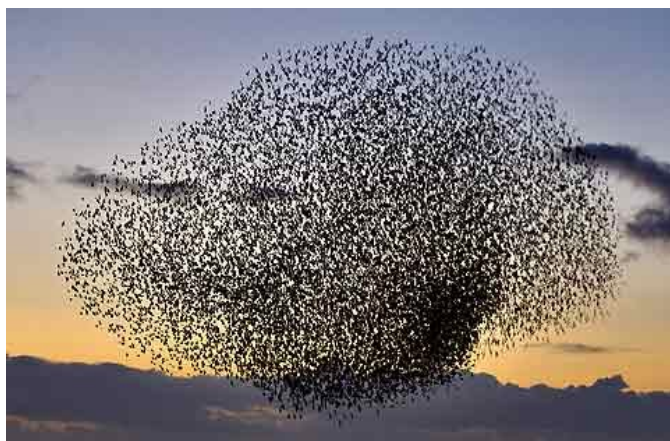


Figure 4.19 Essaim d'étourneaux (*Source : inconnue*)

4.4.3 Impact sur le réseau de télécommunications

Comme développé précédemment (voir section 3.5), l'ensemble des messages liés au contrôle des chauffe-eaux et à la remontée des températures transite sur un réseau de télécommunications. Ce réseau de télécommunications reprend l'ensemble des caractéristiques de celui développé et déployé par Hydro-Québec pour ses compteurs d'électricité : réseau de type maillage avec routeurs et collecteurs, des débits de 9.6 kbps entre compteurs et routeurs et de 19.2 kbps entre routeurs et collecteurs.

Le rôle du réseau de télécommunications est double :

1. il permet de rendre encore plus réaliste les simulations produites puisqu'il retranscrit les délais entre l'émission et la réception des messages ;
2. il permet aussi d'évaluer le taux d'occupation des équipements.

Dans ce sens, des statistiques sont produites à la fin des simulations. Ainsi dans le cas de la simulation précédente, pour un contrôle en champ moyen avec 400 maisons équipées sur une ville de 3300 maisons⁶, les résultats obtenus sont répertoriés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 Résultats du réseau de télécommunications pour une simulation en champ moyen de 400 maisons sur un maillage à 3300 noeuds avec mise à jour horaire de la commande.

Délai moyen montant	19 s
Délai maximal montant	38 s
Délai moyen descendant	303 s
Délai maximal descendant	414 s
Taux d'occupation moyen des noeuds du réseau	0.13 %
Taux d'occupation maximal des noeuds du réseau	22 %

Le "délai montant" correspond au temps nécessaire à un message émis par le contrôleur du chauffe-eau pour atteindre l'ordinateur central. Le "délai descendant" correspond au temps nécessaire aux les messages de diffusion (broadcasts) émis depuis l'ordinateur central pour atteindre l'ensemble des contrôleurs. Le "broadcast" correspond à l'envoi de la commande commune (24 températures de consigne + la température moyenne de la population) depuis l'ordinateur central vers l'ensemble des chauffe-eaux.

La durée des broadcasts est particulièrement lente au regard des délais montants avec un facteur 10 de différence. Cela s'explique par l'absence d'un protocole de broadcast intégré nativement dans les compteurs d'Hydro-Québec. Ainsi, le broadcast ne peut s'effectuer que

6. 400 compteurs sur les 3300 simulés génèrent et reçoivent des messages. Les autres ne servent qu'à générer le maillage du réseau.

par des envois individuels point-à-point, qui sont alors particulièrement coûteux. Il serait possible de réduire cette durée significativement en mettant à jour le protocole de communication des compteurs.

Le taux d'occupation des noeuds du réseau est particulièrement faible, ce qui correspond bien à l'objectif d'avoir des communications minimales entre les différents acteurs. Le taux d'occupation de 22% correspond à un noeud stratégique du maillage qui peut être éventuellement allégé par un processus de "re-routage" des messages.

4.4.4 Impact de la fréquence de mise à jour du champ-moyen

Mise à jour de la consigne (lien descendant)

Lorsqu'une commande est diffusée depuis l'ordinateur central vers la population de chauffe-eaux, celle-ci comporte 24 températures de consigne pour les 24 prochaines heures ainsi que la température moyenne de la population. L'algorithme local champ-moyen utilise cette température pour générer la trajectoire pour l'heure à venir. Pour les horaires suivants, l'algorithme utilise une *prévision* de l'évolution de cette valeur moyenne. Or cette prévision n'est pas forcément totalement exacte et peut entraîner un écart entre la réalité et cette prévision. Cette écart se traduit à terme par un décalage entre la consigne et la température moyenne du parc.

Ainsi, une simulation où la consigne de 24 heures est re-générée et transmise toutes les heures (*rolling horizon*) a un avantage certain sur une simulation où la consigne est transmise quotidiennement. Sur le graphique 4.20, deux parcs de chauffe-eaux sont étudiés. Le bleu voit sa consigne être actualisée une fois par jour à minuit. Le rouge voit sa consigne actualisée une fois par heure, à heure pile. Là où le bleu a du mal à suivre la consigne, la courbe rouge atteint la consigne avec une précision remarquable⁷.

Si l'actualisation heure par heure permet d'augmenter la précision du système contrôlé, elle est aussi plus coûteuse en télécommunications (pour information, les résultats du tableau 4.2 sont fournis pour une mise à jour horaire).

Le graphique 4.21 quantifie l'influence de la fréquence de rafraîchissement de la consigne sur l'erreur entre la consigne et la réalisation de cette consigne. Ainsi, ce graphique montre, par exemple, que l'erreur consigne/réalisation est 40% plus élevée avec une actualisation de la consigne toutes les 12 heures, par rapport à une actualisation toutes les heures. Comme la consigne est horaire (24 températures pour les 24 heures à venir), il est inutile de rafraîchir

7. Pour rappel, la consigne doit être atteinte à la fin de chaque heure, c'est à dire que la courbe simulée doit atteindre la courbe de consigne à l'extrémité droite de chaque plateau.

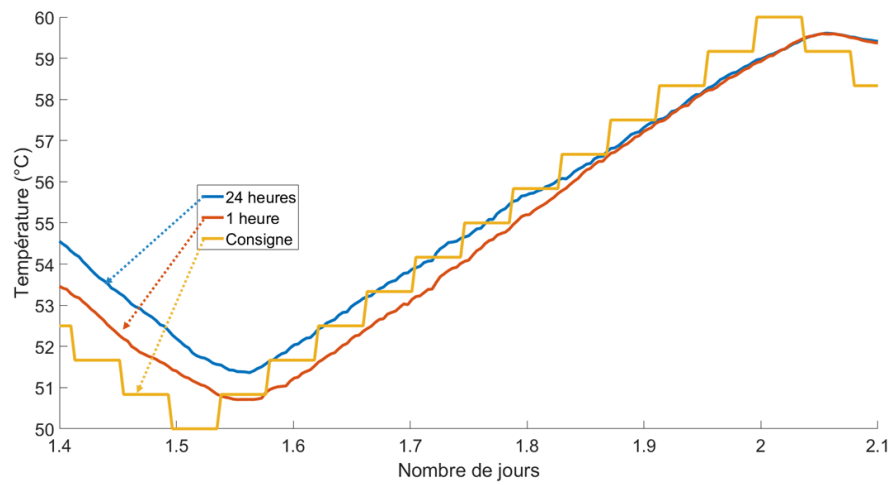


Figure 4.20 Différence entre un rafraîchissement horaire ou journalier pour une commande identique.

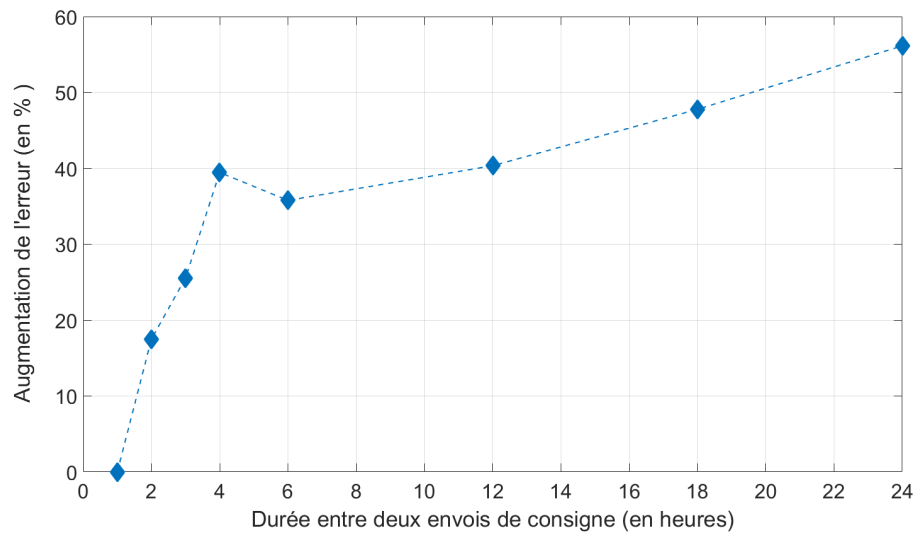


Figure 4.21 Augmentation de l'erreur commande/réalisation par rapport à une actualisation horaire.

cette consigne avec une fréquence inférieure à l'heure.

Fréquence de remontée de la température (lien montant)

Afin d'actualiser la valeur de la température moyenne⁸ du parc de chauffe-eaux, les contrôleurs champ-moyen communiquent la température de leur chauffe-eau de manière aléatoire à l'ordinateur central. Cette émission de température suit un processus de Poisson. Ce processus de Poisson permet d'éviter des émissions simultanées et donc d'engorger le réseau de télécommunications. De plus, un processus de Poisson est respectueux de la vie privée des utilisateurs, car c'est un processus uniquement du bas vers le haut. En aucun cas l'ordinateur central ne peut interroger un chauffe-eau pour connaître sa température. Les possibilités d'espionnage d'un individu en particulier sont donc considérablement réduites.

Il est alors important d'étudier l'impact du facteur d'émission moyen (facteur λ du processus de Poisson). En effet, une dualité s'impose :

- un taux d'émission élevé permet une meilleure évaluation de la température moyenne mais requiert de plus grands moyens de télécommunications et est plus intrusif.
- un taux d'émission plus faible est économe en moyen de communications mais ne permet pas un suivi suffisamment exact de la température moyenne de la population.

Le graphique 4.22 montre l'écart maximal entre la vraie température moyenne du parc et l'estimation faite par l'ordinateur central en fonction du nombre moyen d'émissions par jour par chauffe-eau pour une population de 50 000 individus sur 10 jours. On voit alors que le choix de 4 émissions permet d'avoir un bon rapport de précision (inférieur à 0.4°C) pour une valeur suffisamment faible d'émission. C'est pourquoi cette valeur a été utilisée dans l'ensemble du présent document.

Il est important de noter aussi que la taille de la population influe aussi sur la précision pour un facteur λ fixé. Ainsi, le graphique 4.23 montre l'écart maximal et moyen d'estimation pour un facteur λ fixé à 4 émissions par jour et un nombre de maisons variant de 10 à 100 000.

8. Pour rappel, la température moyenne permet de générer la commande champ-moyen globale et locale

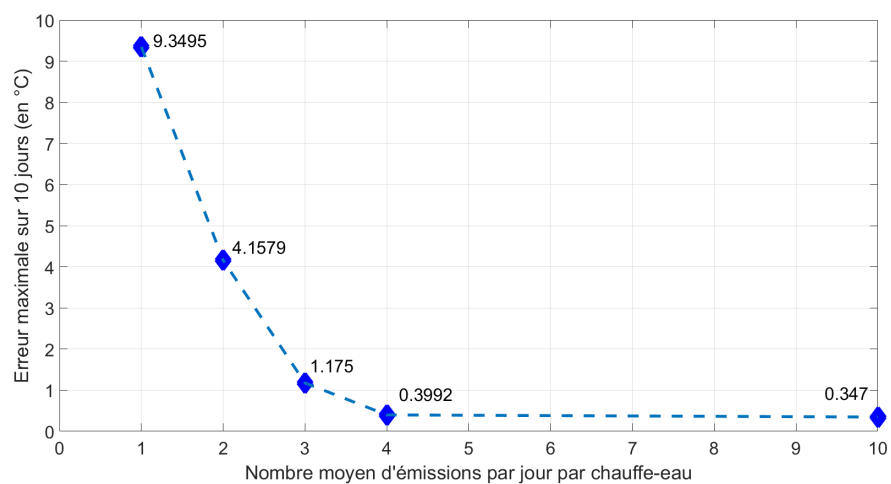


Figure 4.22 Écart maximal d'estimation de la température moyenne en fonction du taux d'émission pour 50 000 maisons pendant 10 jours

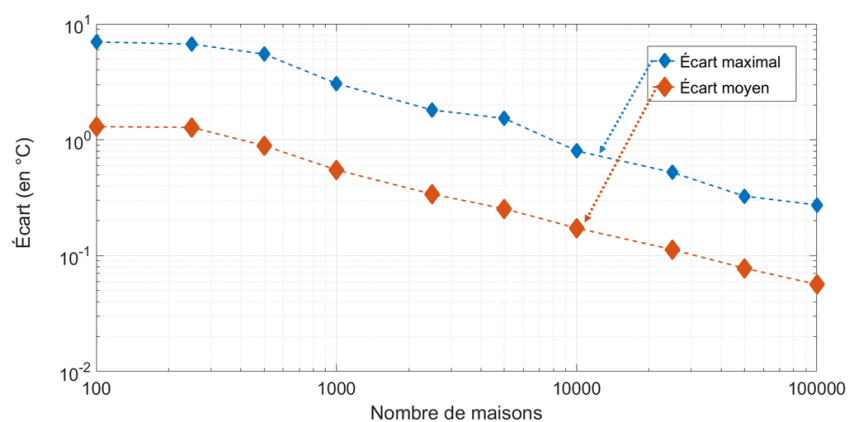


Figure 4.23 Écarts d'estimation de la température moyenne en fonction du nombre de maisons avec 4 émissions par jour pendant 10 jours

4.5 Tableau récapitulatif sur les différents types de contrôles

Tableau 4.3 Tableau récapitulatif sur les différents types de contrôles.

	Thermostatique	Délestage par horaire	Limitation de la puissance	Champ moyen
Trajectoire optimale	NA	moyenne glissante 12h	moyenne glissante 12h	minimisation de la variation de charge
Efficacité	NA	moyenne	très bonne	très bonne
Impact sur la variance	grand	grand	faible	faible
Taux d'insatisfaction	nul	fort	moyen à faible	nul
Complexité de mise en œuvre	NA	faible	moyenne à grande	grande
Déjà existant	oui	oui (ex. France)	en expérimentation localement (ex. PowerShift Atlantique)	non
Capacité d'absorption des EnR	non	nulle à faible	à étudier	grande (voir chapitre 5)

CHAPITRE 5 ÉTUDE DE RÉSILIENCE FACE AUX PERTURBATIONS

Jusqu'ici, l'ensemble des études ont été réalisés dans un cadre "stable", c'est-à-dire que les prévisions de consommation sont supposées parfaites, que le réseau est stable et en régime permanent. Or, la réalité peut diverger de ce cas de figure. Ainsi, dans cette troisième partie, des simulations représentant ces "irrégularités" du réseau sont réalisées et présentées. Deux grands cas sont présentés :

- les cas d'une coupure de courant généralisée : comment le contrôle appliqué aux chauffe-eaux réagit-il lors d'une coupure de courant et, le plus important, lors de la remise en route.
- les capacités d'absorption des EnR : dans cette étude, les impacts des erreurs de prédiction sur le contrôle sont présentés.

Dans tout ce chapitre, le contrôle appliqué aux chauffe-eaux est un contrôle en champ-moyen, tel que présenté dans la section 4.4.

5.1 Dans le cadre d'une coupure de courant généralisée : black-out

Le *black-out* est une coupure généralisée d'un quartier, d'une ville ou d'une région entière pendant une durée allant de quelques minutes à plusieurs jours. Les causes d'un black-out sont diverses, mais sont souvent liées à une demande en énergie trop importante par rapport aux capacités de production disponibles ou une saturation dans le réseau de distribution, due par exemple à la perte d'une ligne (voir Pourbeik et al., 2006).

Dans le cas de réseaux électriques inter-connectés, les black-outs ont en plus un effet domino, et le black-out d'une région peut se propager aux régions voisines.

Comme dans le cas d'un délestage horaire à un groupe (voir section 4.2), le moment de la remise en route du réseau est particulièrement délicat, puisqu'une grande partie de la population de chauffe-eaux est en attente de chauffage.

Ainsi, dans le cas d'une population équipée de contrôleurs thermostatiques classiques, la reprise en charge est marquée par un sévère phénomène de *payback*.

Le graphique 5.1 montre la réponse moyenne pour un contrôle thermostatique classique (en **vert**). Comme pour le cas d'un délestage, un pic de reprise est observé. Sur ce même graphique, en jaune, la réponse du parc équipé de contrôleur champ-moyen est affichée.

La première conclusion est que le champ moyen est capable de réduire fortement le pic de reprise en charge du parc. Le blackout correspond pour les chauffe-eaux à un défaut d'énergie

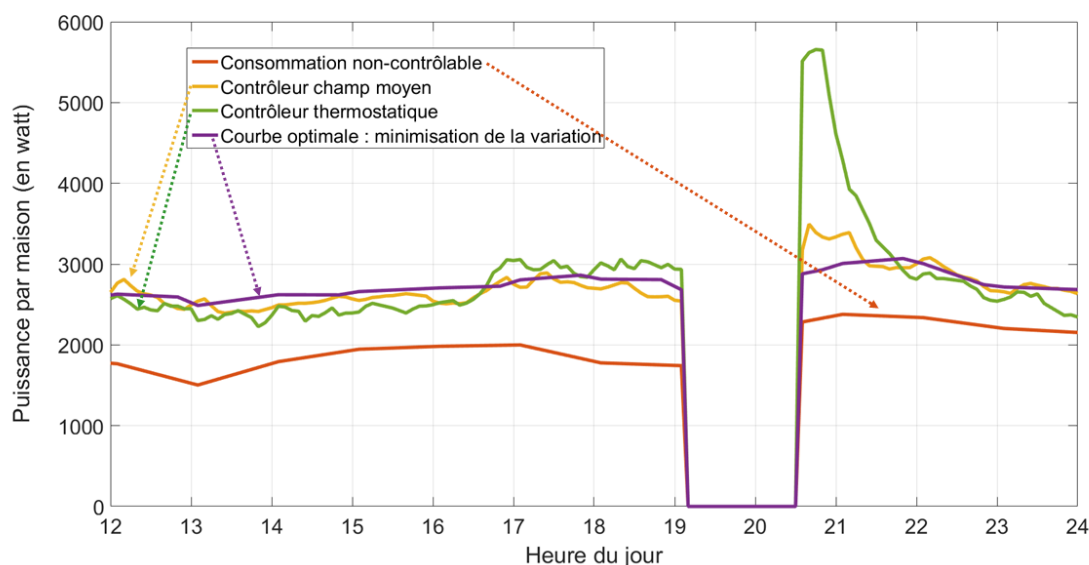


Figure 5.1 Réaction face à une coupure de courant (19h10 - 20h30) pour un parc thermostatique et un parc champ moyen.

qu'il faut inévitablement compenser.

Le contrôleur thermostatique compense ce défaut immédiatement et le plus vite possible (en utilisant la puissance nominale du chauffe-eau). À l'inverse, le contrôleur champ-moyen compense cette perte sur le long terme. Le contrôleur ne cherche pas à rattraper le retard pris immédiatement mais sur une durée plus longue. Cela se traduit par une consommation des chauffe-eaux qui est légèrement supérieure à la consommation optimale mais qui vient finalement *rejoindre* celle-ci après quelques heures.

Il est important de noter que dans le cas d'une coupure de quelques heures, ce "défaut" d'énergie dans les chauffe-eaux se traduit par une perte de quelques degrés de la température moyenne, ce qui est dans la plupart des cas totalement imperceptible pour les usagers. Par exemple, dans la simulation de la figure 5.1, le taux de client insatisfait est nul dans les deux cas (thermostatique et champ-moyen).

Aussi, la commande champ-moyen n'est pas régénérée à l'issue du black-out. Lorsque le réseau est remis sous tension, les contrôleurs champ-moyen continuent à fonctionner sur la dernière commande diffusée (à minuit de la même journée). Cette capacité est indispensable car les "black-out" génèrent aussi une interruption de la majeure partie des systèmes de télécommunications. Ainsi, sur le graphique 5.1, la consigne n'est jamais réactualisée.

Cette capacité de reprise en charge contrôlée est intrinsèquement liée au contrôle en champ

moyen et n'est pas le résultat d'un module supplémentaire dans l'algorithme du contrôleur champ moyen. Dans la présentation du contrôle en champ moyen (voir section 3.4), il a été présenté qu'une des particularités de ce contrôle est de perturber un minimum la population. Les commandes sont adaptées à chaque chauffe-eau et suivent une évolution "douce". Cela empêche donc une trop forte reprise en charge. Le champ moyen est "conscient" de la perte de chauffage, et par conséquent de l'impact sur la température moyenne prédite.

Grâce à un tel contrôle, le phénomène de *payback* suite à un *blackout* est grandement diminué (−80%). Cette diminution permet de remettre en marche les régions subissant une coupure d'électricité, de façon plus rapide et plus sûre.

Numériquement, le phénomène de *payback* pour une population équipée de contrôleur thermostatique est évalué à 2500 W par maison. Pour les maisons équipées de contrôleur champ-moyen, ce pic ne dépasse pas les 500 W.

Un biais de cette étude est qu'il est considéré que les chaînes de Markov restent les mêmes pendant les périodes de coupures électrique. C'est-à-dire que les habitudes de consommation d'eau chaude, en moyenne, ne sont pas changées en cas de coupures d'électricité. Sans remettre en cause les capacités du champ moyen à gérer en douceur une remise en route d'un parc de chauffe-eaux, ce biais peut impacter l'ampleur des pics de reprise pour les contrôleurs thermostatiques et champ moyen. Le phénomène de *payback* de la consommation non-contrôlable n'est aussi pas pris en compte. Mais cela n'affecte pas les conclusions établies ci-dessus.

5.2 Absorption des énergies renouvelables non-contrôlables

Trouver le moyen de produire une énergie décarbonnée et renouvelable est un défi sans pareil pour les scientifiques du XXI^{ème} siècle. L'énergie solaire et l'énergie éolienne sont aujourd'hui les deux fers de lance de cette énergie décarbonnée¹. Or, ces sources d'énergie sont non-contrôlables et difficilement prévisibles. Bien entendu, les modèles de prévision météorologiques permettent de prévoir l'ensoleillement et la vitesse du vent des sites de production, mais un aléa existe toujours.

Un des buts du projet smartDESC est de démontrer la capacité des chauffe-eaux domestiques (et chauffe-espaces) d'absorber les variations et imprévus de la production éolienne. Pour prendre en compte l'aléa des prévisions de production éolienne, une nouvelle version "stochastique" du simulateur a été mise en place. L'optimisateur central décrit dans les sec-

1. l'énergie hydrauliques est aujourd'hui la première source d'EnR, mais sa part dans le mix énergétique des pays développés est en stagnation car la majeure partie des sites disponibles est déjà utilisée.



Figure 5.2 Éoliennes sur ciel bleu (*Source : Google Image*)

tions 3.3 et 4.4 est modifié afin d'accepter non plus une unique prévision de consommation non-contrôlable, mais N trajectoires différentes de la consommation non-contrôlable et M trajectoires de la production éolienne (dans les études suivantes, $N = M = 22$).

5.2.1 Optimisation stochastique

Génération des prévisions stochastiques

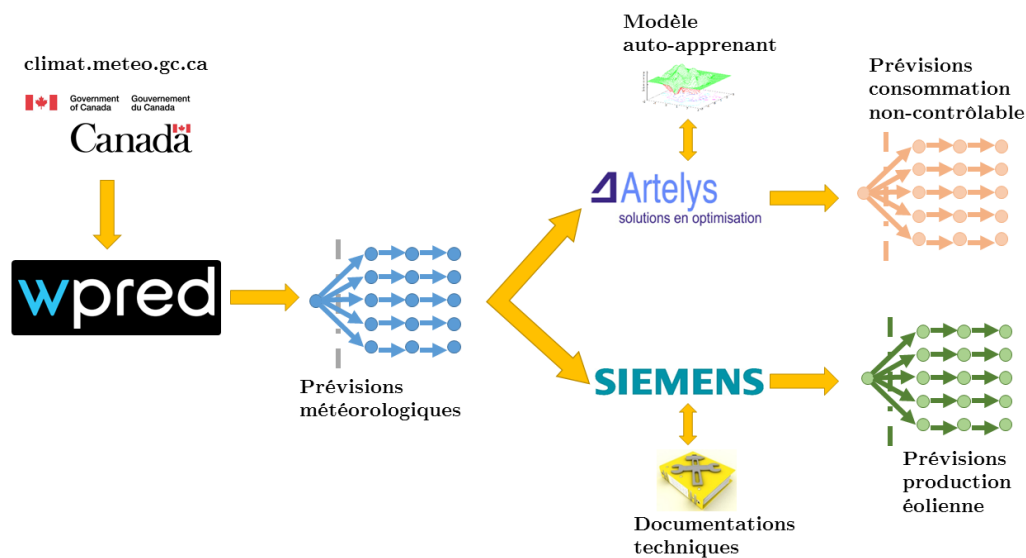


Figure 5.3 Chaîne de génération des prévisions de consommation et de production.

Le nouvel optimisateur (dit optimisateur stochastique) prend donc en entrée, en plus de la

température moyenne de la population, N scénarios de la consommation non-contrôlable et M scénarios de la production éolienne. Les scénarios sont générés de la manière suivante :

1. La société WPred, spécialisée dans les prévisions de production éolienne et solaire, fournit 22 scénarios météorologiques équiprobables pour les 24 prochaines heures à venir. Ces prévisions sont faites à partir des données produites par le gouvernement du CANADA. Ces scénarios renseignent les informations suivantes : la vitesse et direction du vent à 0 et 100 mètres et la température de l'air et de la pression atmosphérique.²
2. Ces informations permettent d'estimer la production éolienne d'un parc éolien dimensionné pour produire 10% de l'électricité consommée par la population étudiée. L'estimation est réalisée en utilisant les abaques de fonctionnement des éoliennes fournis par les constructeurs.
3. Ces scénarios permettent aussi d'alimenter un module de prévision de la charge non-contrôlable fourni par la société Artelys. Ce module a été conçu à partir des données SCADA utilisées dans l'ensemble de ce mémoire. Ce module est capable, à partir d'une prédiction météo, de générer une prédiction de consommation non-contrôlable. Ainsi, les 22 scénarios météorologiques permettent d'obtenir 22 scénarios de consommation non-contrôlable.

Le figure 5.3 schématise la démarche précédente.

Les graphiques 5.4 et 5.5 montrent les différents scénarios de production éolienne et de consommation non-contrôlable pour une journée d'automne. La probabilité de réalisation de chacun de ces scénarios est la même et vaut, dans notre cas, 4.545%.

Ces courbes permettent d'émettre les informations suivantes :

- Quelques heures suffisent pour avoir une réelle diversité des scénarios éoliens³.
- Il est assez difficile de prévoir à horizon 6 heures avec certitude la production éolienne.
- Les scénarios éoliens présentent des variations très différentes et peuvent s'entrecouper.
- La prévision de la consommation présente une diversité plus faible : l'allure de la consommation est la même sur l'ensemble des scénarios.
- D'une manière générale, les scénarios de consommation ne s'entrecoupent pas. Après une dizaine d'heures, ils pourraient même être définis par un scénario commun et une constante propre. Une description plus fine des charges domestiques permettrait probablement d'obtenir une variabilité plus significative entre les divers scénarios.

Ces graphiques montrent que la complexité et la variation du problème se situe principalement au niveau de la production éolienne. Les scénarios de consommation sont dans une première

2. La température et la pression de l'air influent directement sur sa densité. Or le rendement des éoliennes dépendent entre autre de la densité du fluide qui les entraînent en rotation.

3. Comprendre : scénarios de production d'énergie éolienne.

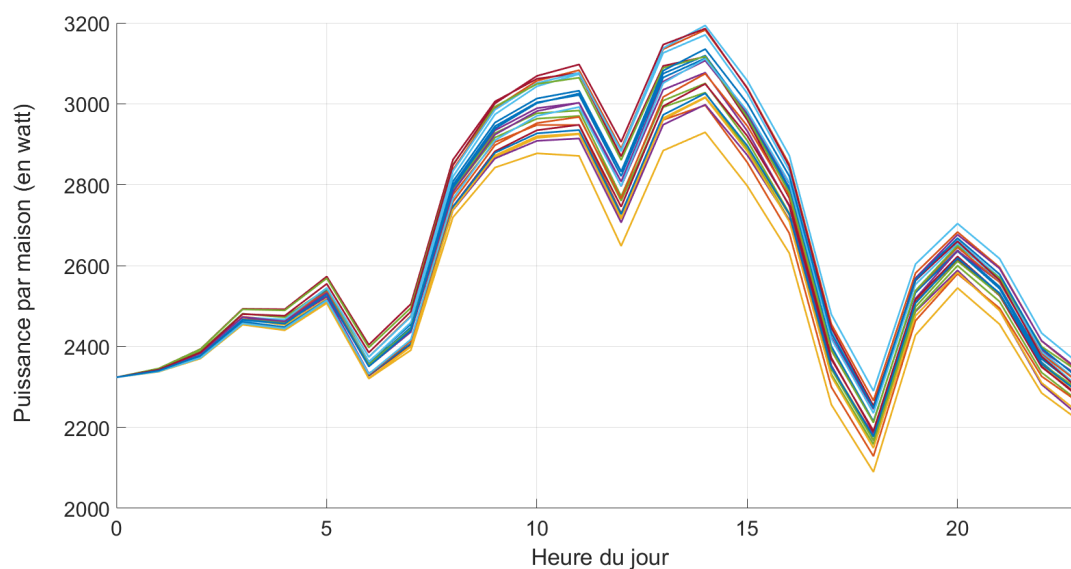


Figure 5.4 Scénarios (22) de prévision de consommation pour la journée du 2 septembre 2016 en banlieue de Montréal.

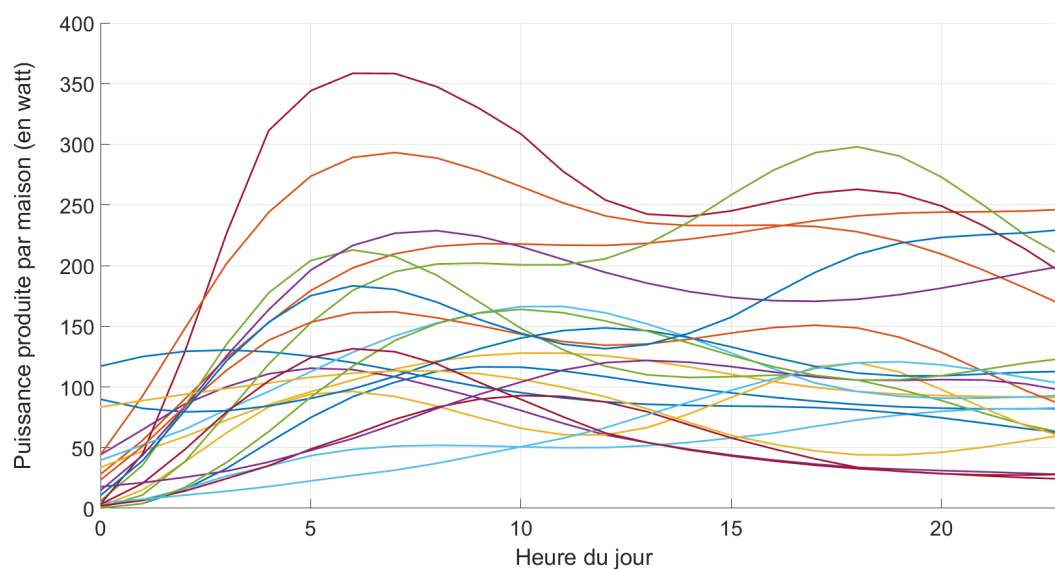


Figure 5.5 Scénarios (22) de prévision de production éolienne pour la journée du 2 septembre 2016 en banlieue de Montréal.

approximation, identiques. Les scénarios éoliens sont tous très différents et leurs variations ne sont pas corrélées. Il est quasiment impossible de dégager une tendance générale des profils de production éolienne.

Dans l'ensemble des simulations suivantes, il est posé que l'un de ces scénarios est celui qui se réalise finalement. Autrement dit, il est supposé que les prédictions ci-dessus sont suffisamment exactes pour que l'un des 22 scénarios proposés décrive la réalité. Évidemment, l'optimisateur central n'est pas au courant à l'avance du scénario réel.

Ces scénarios sont générés toutes les heures pour une durée de 24 heures, permettant la mise en place d'un *rolling horizon*.

Après génération de l'ensemble des scénarios, ceux-ci sont transmis à l'ordinateur central qui se charge de générer la commande optimale résultante.

Optimisation stochastique

L'utilisation de l'ensemble de ces scénarios permet à l'optimisateur central de générer une commande unique (24 températures pour les 24 heures à venir), qui prend en compte la diversité des évolutions futures. Cette commande est réactualisée toute les heures afin de prendre en compte l'évolution prise par la production éolienne et par la consommation non-contrôlable.

Pour réaliser son optimisation stochastique, l'ordinateur central à besoin des informations suivantes :

- Les scénarios de la consommation non-contrôlable (22 scénarios de 24 heures),
- La consommation non-contrôlable instantanée (donnée par le scénario choisi parmi les 22 scénarios possibles),
- Les scénarios de la production éolienne (22 scénarios de 24 heures),
- La production éolienne instantanée (donnée par le scénario choisi parmi les 22 scénarios possibles),
- La température moyenne du parc de chauffe-eaux (obtenue à partir des remontées de température, voir section 4.4.4)
- Les chaînes de Markov pour les 24 prochaines heures
- Les caractéristiques des chauffe-eaux connectés du parc (puissance, capacité, température d'entrée d'eau, etc...)

L'ensemble de ces informations permet à l'ordinateur central de générer la consigne. La consigne pour l'optimisation stochastique est rafraîchie et transmise aux contrôleurs toutes les heures.

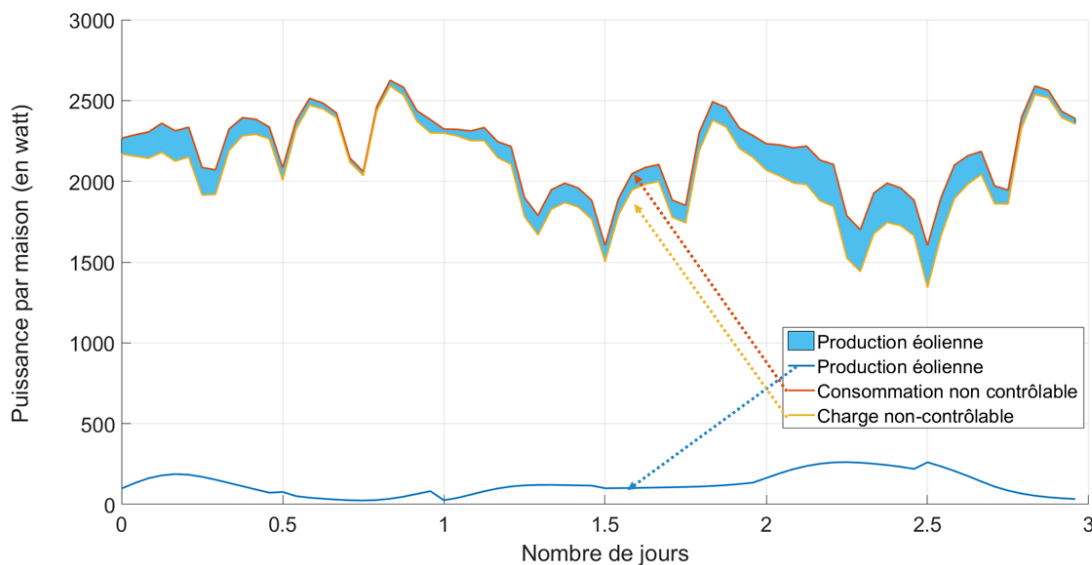


Figure 5.6 Scénarios de charge et de production retenus pour la simulation.

Puisque l'algorithme d'optimisation stochastique doit prendre en compte l'ensemble des scénarios possibles dans son processus d'optimisation, les résultats bruts de l'optimisation⁴ obtenus sont souvent moins *bons* que ceux présentés dans la section 4.4, où l'optimisateur reçoit une seule prévision de consommation. Cependant, l'optimisation stochastique possède une résilience plus forte. Si une erreur de prévision est réalisée, le système réagira mieux car l'optimisation est réalisée sur une diversité de scénarios possibles. De plus, la diversité des états thermiques des chauffe-eaux obtenue à l'aide du contrôle en champ moyen (voir section 4.4.2) permet elle aussi une meilleure résilience aux perturbations (voir section 5.2.2).

Dans cette étude, la consommation non-contrôlable et la production éolienne sont deux "flux" d'énergie qui sont semblables. En effet, ils sont tous les deux non-contrôlable et sont des données exogènes à la simulation. Ainsi, dans les résultats présentés ci-dessous, ces deux "flux" seront agrégés dans une flux unique appelé : **charge non-contrôlable**. Cette "charge non-contrôlable" correspond à la consommation non-contrôlable des maisons moins la production éolienne.

Le graphique 5.6 montre le processus permettant d'obtenir la charge non-contrôlable à partir de la production éolienne et de la consommation non-contrôlable. Les courbes de production éolienne et charge non-contrôlable sont des scénarios particuliers pris parmi les 22 scénarios

4. Le résultat brut de l'optimisation est la trajectoire optimale de charge définie par l'optimisateur. Autrement dit, c'est la charge totale que l'on obtient si les chauffe-eaux suivent parfaitement la consigne donnée par l'optimisateur.

générés et qui sont considérées, pour la simulation, comme : "*ce qui se passe réellement*". L'optimisateur n'est pas au courant de ce choix et reçoit les 22 scénarios avec une probabilité de réalisation égale.

Résultat de l'optimisation pour 10% puissance installée éolienne

La simulation est réalisée sur trois jours pour une banlieue de Montréal pendant le mois de septembre 2015.

La figure 5.7 montre 3 courbes :

- la charge non-contrôlable : présentée ci-dessus, elle correspond à la consommation non-contrôlable moins la production éolienne,
- la charge simulée : elle correspond à la consommation moyenne des maisons équipées de contrôleur à champ moyen moins la production éolienne,
- la charge optimale : elle est le résultat de l'optimisation de la charge réalisée suivant la méthode de la limitation de la variation de la charge. Elle inclut aussi la production éolienne.

Toutes ces courbes incluent la production éolienne dans leur tracé, c'est à dire que la production éolienne effective (celle du scénario choisi) est retranchée à la consommation des maisons. Le but ici est de montrer qu'il est possible de localement absorber la production d'un parc éolien. Les données de météo permettant de générer les scénarios de production et

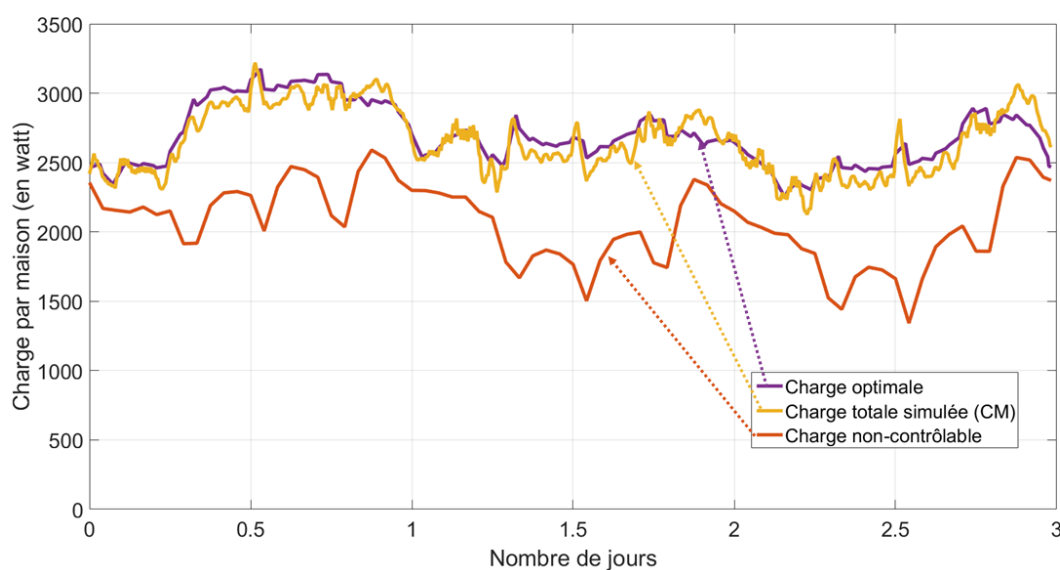


Figure 5.7 Résultats pour une simulation stochastique sur 3 jours pour 600 maisons avec 10% de puissance éolienne.

de consommation sont les mêmes : il s'agit bien d'une étude locale (à l'échelle d'une ville).

Cette figure 5.7 montre la capacité des algorithmes champ moyen à absorber localement l'énergie éolienne produite. Ainsi, pour le reste du réseau électrique (extérieur au parc contrôlé), la charge moyenne perçue est la courbe jaune de la figure 5.7. Les variations et le caractère imprédictible de l'éolien sont gérés localement et sont donc invisibles pour le reste du réseau.

Dans cette simulation, l'énergie produite par l'éolien correspond à 5% de l'énergie totale consommée et la puissance produite par l'éolien peut atteindre 10% de la charge totale.

Il est possible de comparer la charge du parc équipé de contrôleurs champ moyen par rapport au même parc (avec la même production éolienne) équipé de contrôleurs thermostatiques. La courbe 5.8 montre à la fois la charge totale thermostatique (en **vert**) et la charge totale champ moyen (en **jaune**). Il ressort que le contrôle champ moyen permet de lisser la charge totale (incluant la production éolienne). Les pics sont réduits et les creux de consommation sont comblés. Même si la courbe de la charge totale champ-moyen ne suit pas parfaitement la charge optimale (en **violet**) à cause des écarts possibles entre les consignes et les réalisations de celles-ci (voir section 4.4.4), les résultats restent très bon au regard du contrôle thermostatique classique.

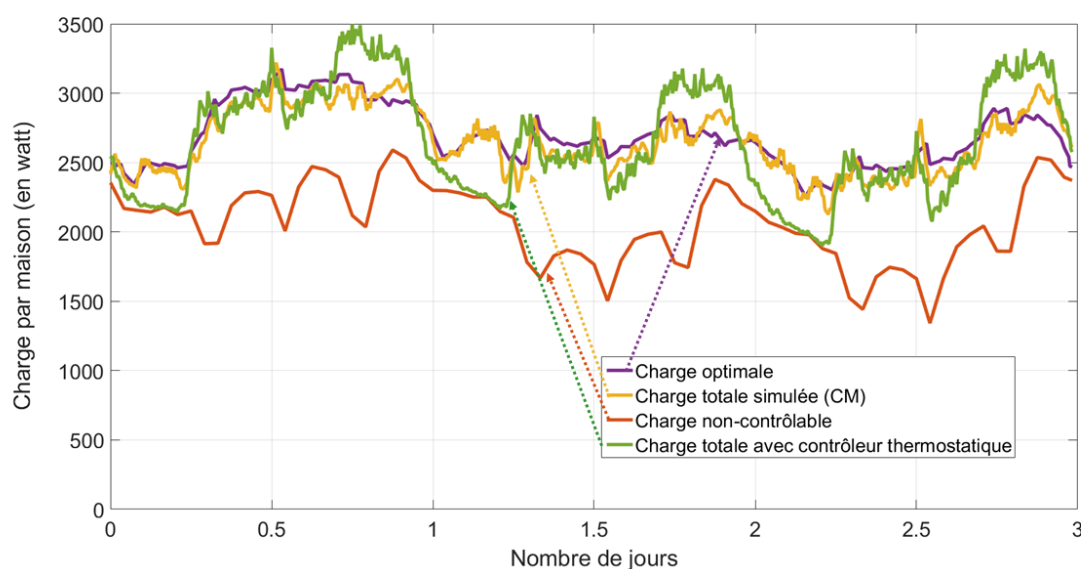


Figure 5.8 Comparaison entre le contrôle champ moyen et thermostatique pour un parc de 600 maisons avec production éolienne avec 10% de puissance éolienne.

Résultat de l'optimisation pour 20% de puissance installée éolienne

Dans un deuxième temps, afin de vérifier la robustesse du contrôle champ moyen, le parc de production éolienne a été doublé pour atteindre 20% de la puissance installée totale.

Ainsi, on observe sur la graphique 5.9 un pic de 500 W de production éolienne durant la 3^{ème} journée. Si l'on compare avec la charge non-contrôlable maximale (≈ 2500 W), on retrouve un ratio de 20%.

Le graphique 5.10 représente les résultats de la simulation d'optimisation de la charge non-contrôlable de la figure 5.9. On retrouve :

- En **orange**, la charge non contrôlable qui correspond à la consommation non-contrôlable des foyers moins la production éolienne à 20%.
- En **violet**, le résultat de l'optimisation de la charge totale par l'algorithme stochastique. Cette courbe correspond aussi à la charge totale si les chauffe-eaux suivent exactement la consigne de température.
- En **jaune**, la charge totale simulée pour un parc de chauffe-eaux équipés de contrôleur champ-moyen. On retrouve toujours des écarts avec la charge optimale dus à "l'écrasement" de la distribution thermique des chauffe-eaux sur les températures de bord (50°C et 60°C).
- En **vert**, la charge totale pour un parc de chauffe-eaux équipés de contrôleur thermostatique, donc sans contrôle.

L'ensemble de ces courbes inclut la production éolienne dans la charge totale, i.e. la production éolienne a été soustraite à la consommation totale pour d'obtenir ces courbes de charge totale.

Ce graphique montre à nouveau la bonne capacité du contrôle champ moyen associé à l'optimisation stochastique à absorber des fluctuations éoliennes, même avec une pénétration éolienne de 20%. En effet, la courbe **jaune** présente des variations assez faibles (au regard par exemple de la courbe thermostatique **verte**). Ainsi, pour le reste du réseau électrique (tout sauf le parc de maisons contrôlées et le parc d'éoliennes), la charge de la communauté de maisons et d'éoliennes présente de faibles variations.

La production éolienne rajoute de la variabilité et de l'imprévu sur le réseau, l'optimisation et le contrôle en champ moyen arrivent localement à absorber ces imprévus et à réduire la variabilité de la charge totale pour une production éolien faible (10% de l'énergie totale et jusqu'à 20% de la puissance totale).

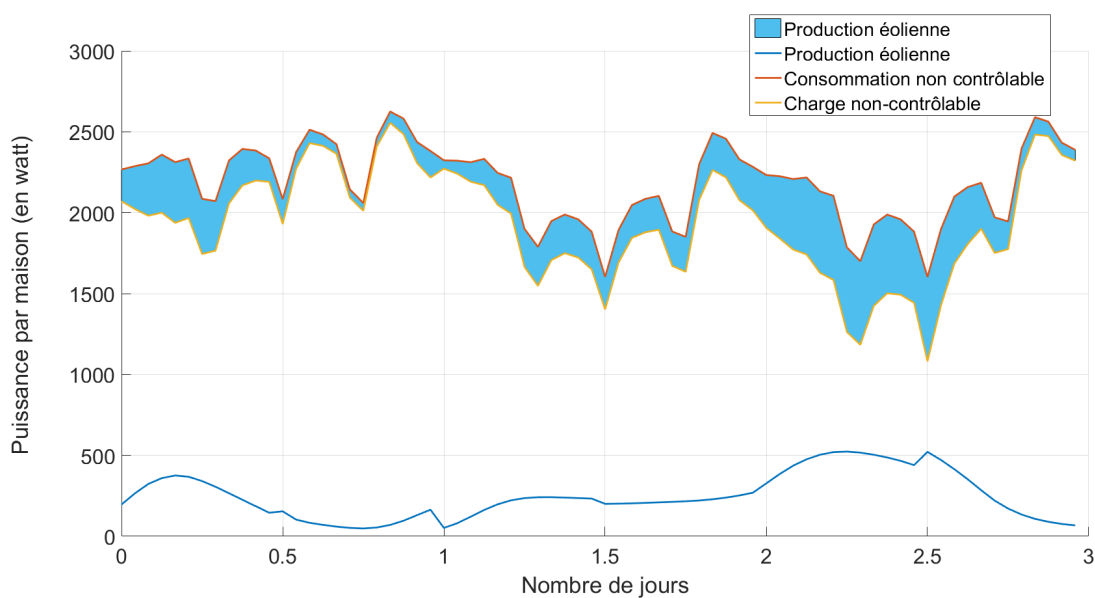


Figure 5.9 Scénarios de charge et de production pour une puissance installée éolien à 20%.

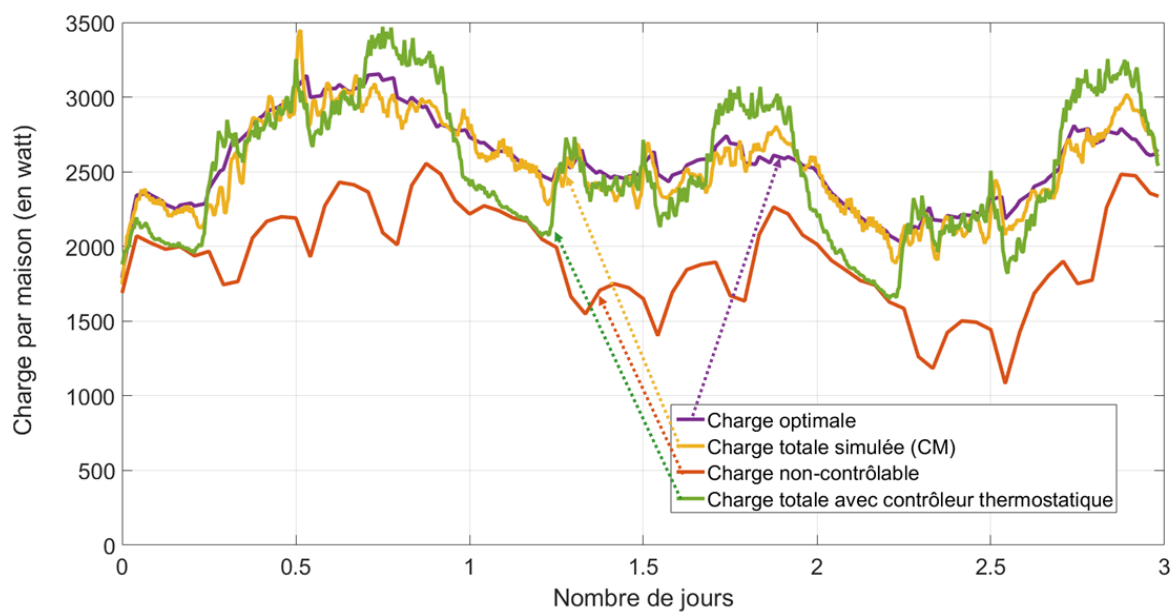


Figure 5.10 Comparaison entre le contrôle champ moyen et thermostatique pour un parc de 600 maisons avec production éolienne avec 20% de puissance éolienne.

5.2.2 Étude de résiliences aux perturbations

Dans la section 5.1, la capacité des contrôleurs champ-moyen à absorber le pic de reprise en charge a déjà été démontrée. Alors que les contrôleurs thermostatiques génèrent des pics de 2500 W à la reprise, les contrôleurs champ moyen réduisent ce pic à seulement 500 W, stabilisant ainsi grandement le réseau lors de sa remise en tension. Ce faible *payback* facilite le travail des énergéticiens lors des situations critiques du réseau.

Cette section veut montrer la capacité de l'optimisation statistique à gérer au mieux les imprévus et les changement de scénarios. Les graphiques 5.4 et 5.5 ont montré une grande variété des scénarios dans le cas de la production d'énergie éolienne. Dans l'étude de cas qui va suivre, le scénario de consommation non-contrôlé choisi parmi les 22 scénarios possibles sera considéré comme stable. En revanche, deux scénarios de production éolienne vont être choisis. Le premier scénario (noté *A*) sera celui réalisé de 0h à 36h. À midi, pendant le deuxième jour, une rupture de scénario sera réalisée et la production éolienne suivra le deuxième scénario (noté *B*).

Tableau 5.1 Scénario de production éolienne en fonction de l'heure de simulation (sur 3 jours)

Heure	Scénario réalisé
0 à 36	<i>A</i>
36 à 72	<i>B</i>

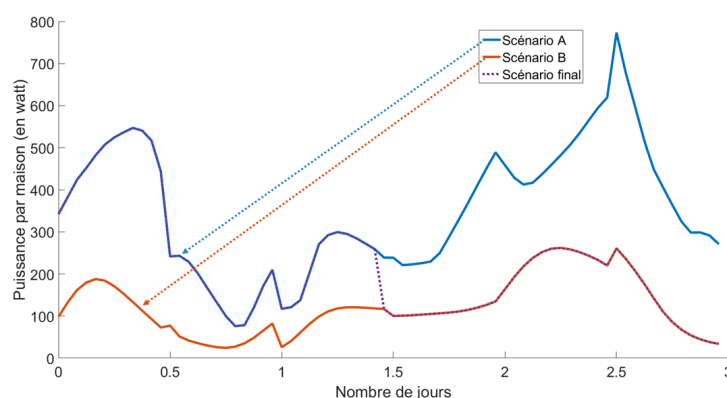


Figure 5.11 Les deux scénarios de production éolienne avec rupture à 12h du jour 2.

Le graphique 5.12 reprend l'ensemble des résultats pour 3 types d'"optimisation" :

- en **Bordeaux**, la charge totale (intégrant la production éolienne) prévisible pour une population équipée de contrôleurs **thermostatiques classiques**.

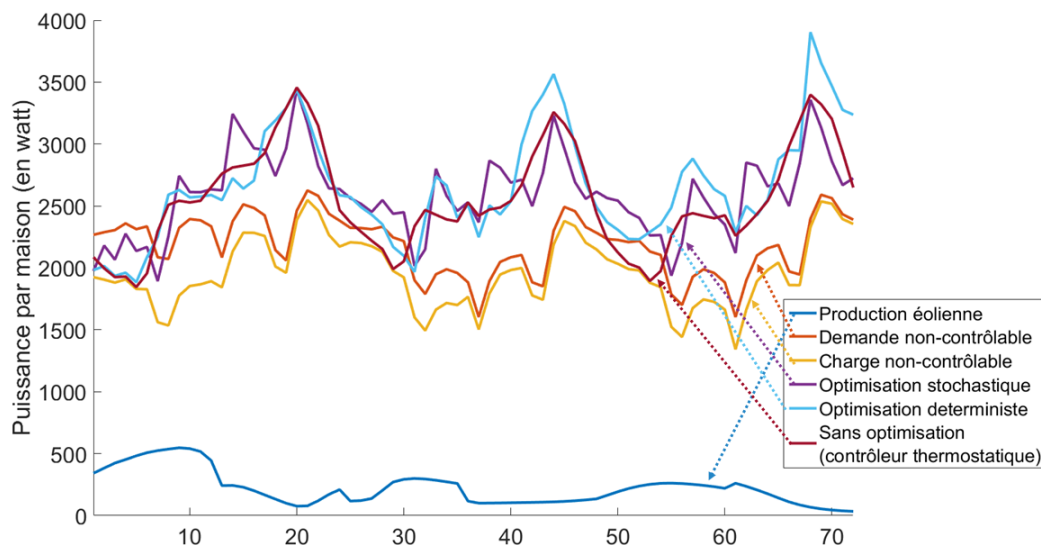


Figure 5.12 Résultats d'optimisation en version déterministe, stochastique et thermostatique (sans contrôle) dans une simulation à changement de scénarios.

- en **Bleu-ciel**, la charge totale (intégrant la production éolienne) pour une population équipée de contrôleurs champ moyen avec une optimisation **déterministe** (identique à celle de la section 4.4).
- en **Violet**, la charge totale (intégrant la production éolienne) pour une population équipée de contrôleurs champ moyen avec une optimisation **stochastique**.

Pour le contrôle stochastique, la consigne est réactualisée toutes les heures. Pour le contrôle déterministe, la consigne est réactualisé à la 36ème heure avec le nouveau scénario de prévision.

Les résultats ne fournissent pas une preuve convaincante de l'avantage d'une optimisation stochastique par rapport à une optimisation déterministe. Cela peut s'expliquer par une variabilité proche entre les deux scénarios *A* et *B*. L'optimisation tentant de réduire la variabilité de la charge totale, le problème demeure semblable entre le scénarios *A* et *B*. La démonstration de la meilleure adaptabilité de l'algorithme stochastique par rapport à l'algorithme déterministe demeure à réaliser avec deux scénarios de production éolienne ayant des variabilités très différentes (par exemple, un scénario de production constante et un scénario de production chaotique).

Une différence majeure rend la comparaison entre ces deux algorithmes (déterministe et stochastique) compliquée. D'un coté, l'optimisateur déterministe optimise la consommation pour une trajectoire donnée. Le résultat est donc la solution optimale pour cette unique trajectoire. L'optimisateur stochastique optimise la consommation pour un ensemble de trajectoires. Le

résultat n'est optimal pour aucune trajectoire prise individuellement mais pour l'ensemble des trajectoires pris dans sa globalité. Aussi, la qualité de l'information de prévision entre les deux optimisateurs n'est pas la même.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

6.1 Synthèse des travaux

Les travaux réalisés dans le cadre de cette maîtrise ont permis de tirer un certain nombre de conclusions.

Le premier point est la capacité permise par le simulateur de réaliser des simulations complètes et réalistes. En intégrant les différents niveaux que composent les systèmes de smart-grid (thermique du chauffe-eau, flux énergétique, télécommunications, etc...), les simulations réalisées permettent d'obtenir des résultats pertinents et exploitables à différentes échelles. Tous les acteurs d'un réseau de smart-grid sont numériquement recréés ainsi que leurs interactions. Il est aussi important de noter la capacité à gérer à la fois des données agrégées et des données particulières. Par exemple, pour le graphique 4.18, la trajectoire d'individus en particulier peut être étudiée en même temps que des résultats statistiques globaux (premier et dernier déciles).

Le deuxième point démontré dans le cadre de ce mémoire est la capacité du champ-moyen de fournir un contrôle stable, équitable et non disruptif à une population vaste. Ce contrôle s'effectue à partir d'une quantité restreinte d'information. De plus, le contrôle à champ moyen préserve en tout temps une diversité des températures (i.e. niveaux d'énergie) des chauffe-eaux et une diversité des puissances injectées, évitant ainsi les phénomènes de "*payback*". Ainsi, le contrôleur champ moyen offre des capacités intéressantes pour limiter les effets de reprise en charge après un épisode de coupure de courant généralisée. À partir d'une consigne unique transmise par l'optimisateur central, les contrôleurs champ moyen sont capable d'adapter cette consigne à leur cas particulier, permettant d'éviter le mécontentement des utilisateurs tout en respectant en moyenne et à grande échelle la consigne fournie.

Le simulateur, à travers son double réseau électrique/télécom, a aussi démontré que l'impact de la mise en place d'un contrôle en champ-moyen est faible pour un réseau de compteurs intelligents de type *Mesh* semblable à celui installé par Hydro-Québec. Le taux d'occupation du réseau de télécommunications pour le contrôle en champ-moyen a été évalué en moyenne à moins de 1% de la capacité totale.

L'optimisateur stochastique montre aussi des capacités importantes de réduction de la variabilité de la charge et d'intégration d'EnR non-contrôlables tel que l'éolien. En étant capable d'analyses de multiples scénarios prédictifs en même temps, l'optimisateur fournit une consigne qui prend en compte les différentes possibilités d'évolution de la charge non-

contrôlable et ainsi éventuellement de faire face à des changements de scénarios.

6.2 Limitations de la solution proposée et améliorations futures

Le présent document ne propose pas d'expérimentation à base de chauffage de maison (chauffe-espace). Or comme indiqué sur la figure 1.2, l'énergie consommée pour le chauffage d'un logement est deux fois supérieures à celle utilisée pour le chauffage de l'eau. Les processus statistiques qui dirigent le tirage d'eau chaude et la perte de chaleur dans une maison sont semblables et peuvent tous deux être adaptés à l'algorithme de contrôle en champ moyen.

De plus, dans toute cette étude, les résultats sont fondés sur des données exogènes (tel que les chaînes de Markov de tirage d'eau, caractéristiques thermiques des chauffe-eaux). La bonne connaissance de ces statistiques est indispensable pour le bon fonctionnement global du système de contrôle de la charge. Ainsi, un écart sur ces données statistiques et techniques entraîne un écart dans la prédiction de la charge associée à une commande donnée. Cependant, à l'aide des différentes remontées de températures moyennes des chauffe-eaux vers l'ordinateur central, il est possible d'évaluer et d'ajuster ces données statistiques. En effet, le chauffe-eau pourrait effectuer régulièrement, à partir d'observations locales, des mises à jour de ses paramètres statistiques de demande d'eau.

Le paragraphe 5.2.2 ne permet pas de fournir une conclusion formelle sur l'avantage de l'optimisateur stochastique par rapport à l'optimisateur déterministe dans le cas d'un changement brusque de scénario de production éolien.

Enfin, l'ensemble de ces résultats numériques ne saurait être pleinement vérifié sans une réalisation technique et réelle d'un contrôleur champ moyen. Dans cette optique, un premier prototype est entré en fonctionnement en mars 2016 à l'École Polytechnique de Montréal. Intégrant les mêmes algorithmes de contrôle en champ-moyen que ceux développés dans le présent document, il aura pour double but de fournir une démonstration technique du projet mais aussi de réaliser une validation croisée des résultats obtenus dans le simulateur.

RÉFÉRENCES

- K. Alanne et A. Saari, “Distributed energy generation and sustainable development”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, no. 6, pp. 539–558, 2006.
- ANCRE, “Les scénarios de l’ancre pour une transition énergétique”, *Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l’Énergie*, 2013.
- D. S. Callaway, “Tapping the energy storage potential in electric loads to deliver load following and regulation, with application to wind energy”, *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 5, pp. 1389–1400, 2009.
- L. Coop, “Coopérative régionale d’électricité de st-jean-baptiste-de-rouville”, 2016, [Online; accessed 08-March-2016]. En ligne : <http://www.coopsjb.com/>
- J. DeCesaro, K. Porter, et M. Milligan, “Wind energy and power system operations : A review of wind integration studies to date”, *The Electricity Journal*, vol. 22, no. 10, pp. 34–43, 2009.
- K. Dodrill, “Demand dispatch—intelligent demand for a more efficient grid”, 2011.
- T. Ericson, “Direct load control of residential water heaters”, *Energy Policy*, vol. 37, no. 9, pp. 3502–3512, 2009.
- H. Farhangi, “The path of the smart grid”, *Power and energy magazine, IEEE*, vol. 8, no. 1, pp. 18–28, 2010.
- FEB, “Le coût d’un black-out”, 2016, [Online; accessed 18-February-2016; Fédération des Entreprises de Belgique]. En ligne : <http://vbo-feb.be/fr-be/Dossiers/Energie-mobilite-environnement/Energie/Le-cout-dun-black-out/>
- É. Gauthier, “Jumelage d’un accumulateur thermique à un chauffe-eau domestique pour la gestion de la consommation électrique”, 1996.
- M. Huang, R. P. Malhamé, et P. E. Caines, “Large population stochastic dynamic games : closed-loop mckean-vlasov systems and the nash certainty equivalence principle”, *Communications in Information & Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 221–252, 2006.
- L. Hughes, “Meeting residential space heating demand with wind-generated electricity”, *Renewable Energy*, vol. 35, no. 8, pp. 1765–1772, 2010.

B. J. Johnson, M. R. Starke, O. A. Abdelaziz, R. K. Jackson, et L. M. Tolbert, “A method for modeling household occupant behavior to simulate residential energy consumption”, dans *Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2014 IEEE PES*. IEEE, 2014, pp. 1–5.

T. Joseph, W. Stirling, et H. Marcy, “Get smart”, *Foreign Affairs*, pp. 160–163, 2010.

A. C. Kizilkale et R. P. Malhamé, “Mean field based control of power system dispersed energy storage devices for peak load relief”, dans *52nd IEEE Conference on Decision and Control*, Déc. 2013, pp. 4971–4976, invited paper.

———, “A class of collective target tracking problems in energy systems : Cooperative versus non-cooperative mean field control solutions”, dans *53rd IEEE Conference on Decision and Control*, Déc. 2014, pp. 3493–3498.

———, “Collective target tracking mean field control for Markovian jump-driven models of electric water heating loads”, dans *19th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, Août 2014, pp. 1867–1872.

———, “Collective target tracking mean field control for electric space heaters”, dans *22nd Mediterranean Conference on Control and Automation*, Juin 2014, pp. 829–834, invited paper.

———, dans *Control of Complex Systems : Theory and Applications*, K. G. Vamvoudakis et S. Jagannathan, édés. to appear, Elsevier, 2015, ch. Control of aggregate electric water heating loads via mean field games based methods. En ligne : <http://www.cim.mcgill.ca/%7Earman/preprints/2015FL.pdf>

———, “Load shaping via grid wide coordination of heating-cooling electric loads : A mean field games based approach”, Groupe d’Études et de Recherche en Analyse des Décisions (GERAD), Canada, Rapp. tech., Juil. 2015. En ligne : <http://www.gerad.ca/en/papers/G-2015-68>

A. C. Kizilkale, F. Sirois, D. Beauvais, B. Bourdel, J. Coulombe, S. Fan, F. Li, R. Losseau, F. Malandra, K. Ratelle, M. Sauvé, J. Solis, A. I. Tammam, M. Anjos, M. Bernier, M. Gendreau, B. Sanso, et R. P. Malhamé, “smartdesc : Smart distributed energy storage controller”, *to be submitted to IEEE Power and Energy Magazine*, Jan. 2016, <http://www.cim.mcgill.ca/%7Earman/preprints/2016PEM.pdf>.

S. Koch, J. L. Mathieu, et D. S. Callaway, “Modeling and control of aggregated heteroge-

neous thermostatically controlled loads for ancillary services”, dans *Proc. PSCC*, 2011, pp. 1–7.

J. Kondoh, N. Lu, et D. J. Hammerstrom, “An evaluation of the water heater load potential for providing regulation service”, dans *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*. IEEE, 2011, pp. 1–8.

S. Larocque. (2010, Février) Hydro va remplacer des compteurs par des modèles intelligents. En ligne : <http://affaires.lapresse.ca/economie/quebec/201002/26/01-4255831-hydro-va-remplacer-des-compteurs-par-des-modeles-intelligents.php>

J.-M. Lasry et P.-L. Lions, “Mean field games”, *Japanese Journal of Mathematics*, vol. 2, no. 1, pp. 229–260, 2007.

J. Laurent et R. Malhamé, “A physically-based computer model of aggregate electric water heating loads”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 3, pp. 1209–1217, 1994.

J.-C. Laurent, G. Desaulniers, R. P. Malhamé, et F. Soumis, “A column generation method for optimal load management via control of electric water heaters”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 3, pp. 1389–1400, 1995.

M. Lefebvre, “Processus stochastiques appliqués”, 2005.

R. Malhamé et C.-Y. Chong, “Electric load model synthesis by diffusion approximation of a high-order hybrid-state stochastic system”, *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 30, no. 9, pp. 854–860, 1985.

J. Minkel, “The 2003 northeast blackout—five years later”, *Scientific American*, vol. 13, 2008.

M. A. Moffet, F. Sirois, et D. Beauvais, “Case studies : Balancing wind generation using electric thermal storage and electric water heaters”, *CanmetENERGY*, no. 2012 067 RP CAS 411 SGZONE, p. 32, 2012.

A. Moreau, “Performance d’un accumulateur thermique central pour le secteur résidentiel”, *communication privée*, vol. 12, 2010.

A. Moreau et R. Caron, “Évaluation expérimentale en laboratoire des accumulateurs thermiques centraux”, *Tech. Rep. LTEE 96-033*, 1996.

P. Pourbeik, P. S. Kundur, et C. W. Taylor, “The anatomy of a power grid blackout”, *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 4, no. 5, pp. 22–29, 2006.

PowerShift Atlantique, “Énergie NB Power”, [Online; accessed 08-March-2016]. En ligne : <https://www.nbpower.com/fr/about-us/projects/powershift-atlantic>

Ressources naturelles Canada, “Statistique : secteur résidentiel”, 2016, [Online; accessed 18-February-2016]. En ligne : http://oee.rncan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/menus/evolution/guide/guide_res_00.cfm

J. Solis, “Développement d’un estimateur d’état énergétique d’un chauffe-eau pour un contrôle par champ moyen”, 2015.

I. Stadler, “Power grid balancing of energy systems with high renewable energy penetration by demand response”, *Utilities Policy*, vol. 16, no. 2, pp. 90–98, 2008.

M. Tesla, “Powerwall; tesla home battery”, *URL : http://www.teslamotors.com/powerwall (accessed : May 2, 2015)*, 2015.

F. K. Tuffner et M. C. Kintner-Meyer, “Using electric vehicles to meet balancing requirements associated with wind power”, 2011.

Wikipedia, “Jeux à champ moyen — Wikipedia, the free encyclopedia”, 2016, [Online; accessed 18-February-2016]. En ligne : http://fr.wikipedia.org/wiki/Jeux_à_champ_moyen

——, “Smart grid — Wikipedia, the free encyclopedia”, 2016, [Online; accessed 18-February-2016]. En ligne : http://fr.wikipedia.org/wiki/Smart_grid

ANNEXE A SCHEMA GLOBAL DU SIMULATEUR EN FONCTIONNEMENT CHAMP MOYEN AVEC OPTIMISATEUR STOCHASTIQUE

