

Projet RENE-034: Gestion des capacités de stockage d'énergie dispersées dans un réseau électrique pour l'amortissement des effets de variabilité des sources d'énergie renouvelables – RAPPORT PUBLIC

Frédéric Sirois, Benoît Bourdel et Roland Malhamé

Département de Génie électrique, Polytechnique Montréal, Montréal (QC), Canada

Dernière mise à jour: 22 juillet 2017

Autres contributeurs chez le promoteur:

Arman C. Kizilkale, J. Coulombe, S. Fan, F. Li, R. Losseau, F. Malandra, K. Ratelle, J. Solis, A. I. Tammam, M. Anjos, M. Bernier, M. Gendreau, B. Sanso

Partenaires:

IREQ – Laboratoire sur les Technologies de l'Énergie (LTE), WPred inc., Artelys, SG2B, Coopérative St-Jean-Baptiste

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>Sommaire exécutif</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Définition et déroulement du projet</b>	<b>4</b>
2.1	Objectif du projet	4
2.2	Raison pour laquelle le projet était nécessaire	4
2.3	Identification et sollicitation des partenaires	5
2.4	Difficultés rencontrées	5
<b>3</b>	<b>Sommaire des développements</b>	<b>7</b>
3.1	Aperçu général	7
3.2	Développement des modules et intégration dans le simulateur	7
3.2.1	Module de simulation numérique de la physique des chauffe-eaux	8
3.2.2	Module d'optimisation du profil agrégé de la consommation électrique	10
3.2.3	Module de contrôle local à champ moyen	12
3.2.4	Module de simulation d'un réseau de télécommunications de type "mesh"	14
3.2.5	Module de simulation multi-agents (simulateur global)	15
3.3	Développement d'une plateforme physique	16
<b>4</b>	<b>Sommaire des résultats</b>	<b>18</b>
4.1	Mise en place des études de cas	18
4.1.1	Hypothèses de travail	18
4.1.2	Aspects pratiques	19
4.2	Cas no.1 : lissage de la charge et optimisation déterministe	19
4.2.1	Considérations générales	19
4.2.2	Résultats	20
4.3	Cas no. 2 : reprise en charge suite à un black-out	25
4.4	Cas no. 3 : équilibrage éolien et optimisation stochastique	26
4.4.1	Considérations générales	26
4.4.2	Génération des prévisions stochastiques	26
4.4.3	Optimisation stochastique	27
4.5	Essais sur la plateforme physique	31
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>34</b>
5.1	Avantages et résultats du projet	34
5.2	Prochaines étapes de R&D dans le domaine	34

# LISTE DES FIGURES

3.1	Schéma d'un chauffe-eau et de son modèle à $N$ couches. . . . .	9
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. . . . .	9
3.3	Représentation en schéma-bloc de l'algorithme d'optimisation de la charge . . . . .	11
3.4	Représentation en schéma-bloc de l'algorithme de contrôle en champ moyen. . . . .	13
3.5	Représentation schématique des deux niveaux de simulation qui se réalisent simultanément, soit la simulation énergétique (bas) et la simulations des télécommunications (haut). . . . .	14
3.6	Schéma du simulateur global et des interactions entre les différents agents et modules à l'intérieur des agents. . . . .	15
3.7	Photos de la plateforme physique installée à Polytechnique Montréal permettant de tester l'implémentation matérielle du contrôleur à champ moyen sur chauffe-eau réel. . . . .	17
4.1	Consommation non-contrôlable pour la semaine du 30 décembre 2013 au 5 janvier 2015. . . . .	19
4.2	Résultat de la commande à champ moyen pour l'étude de cas no. 1, appliquée sur une population de 400 maisons. . . . .	20
4.3	Évolution de la température moyenne de la population de chauffe-eaux avec un contrôle champ moyen sur 400 maisons. . . . .	21
4.4	Puissance moyenne consommée par la population de chauffe-eaux avec un contrôle à champ moyen sur 400 maisons. . . . .	21
4.5	Distribution de la température moyenne d'un parc de 400 chauffe-eaux avec un contrôle déterministe à champ moyen. . . . .	22
4.6	Trajectoires individuelles de la température moyenne de 3 chauffe-eaux choisis au hasard parmi une population de 400 chauffe-eaux avec un contrôle à champ moyen. . . . .	23
4.7	Essaim d'étourneaux ( <i>source : inconnue</i> ). . . . .	24
4.8	Profils de la puissance moyenne consommée par maison en lien avec une coupure d'alimentation électrique entre 19h10 et 20h30 pour un parc de 400 chauffe-eaux équipés de contrôleurs i) thermostatiques (vert) et ii) champ moyen (jaune). . . . .	26
4.9	Chaîne de génération des prévisions de consommation et de production éolienne. . . . .	27
4.10	Scénarios (22) de prévision de production éolienne pour la journée du 2 septembre 2016 en banlieue de Montréal. . . . .	28
4.11	Scénarios (22) de prévision de consommation pour la journée du 2 septembre 2016 en banlieue de Montréal. . . . .	28
4.12	Scénario de consommation non-contrôlable et de production éolienne retenus pour l'étude de cas no. 3. . . . .	29
4.13	Résultats d'une simulation stochastique sur 3 jours pour 600 maisons avec un taux de pénétration de 10% de puissance éolienne par rapport à la puissance en pointe du réseau. . . . .	30
4.14	Comparaison entre le contrôle champ moyen et thermostatique pour un parc de 600 maisons avec un taux de pénétration de 10% de puissance éolienne par rapport à la puissance en pointe du réseau. . . . .	30
4.15	Scénario de consommation non-contrôlable et de production éolienne retenus pour une étude de cas avec 20% de puissance éolienne installée par rapport à la puissance en pointe du réseau électrique. . . . .	32
4.16	Comparaison entre le contrôle champ moyen et thermostatique pour un parc de 600 maisons avec production éolienne atteignant 20% de la puissance en pointe du réseau électrique. . . . .	32

# Chapitre 1

## Sommaire exécutif

Le projet RENE-034 a été financé entre 2012 et 2016 dans le cadre des initiatives éco-énergétiques du gouvernement fédéral du Canada (EcoEII), dans la catégorie “Programme de R & D”. Le promoteur du projet était l’École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada. Le projet a été mené en collaboration avec plusieurs partenaires canadiens, soit le Laboratoire sur les Technologies de l’Énergie (LTE) de l’IREQ (Institut de Recherche d’Hydro-Québec), WPred Inc., Artelys, SG2B, ainsi que la Coopérative St-Jean-Baptiste (petit distributeur d’électricité en Montérégie).

Le projet, rebaptisé smartDESC par le promoteur (smart Distribution Energy Storage Controller), visait à fournir une approche de contrôle applicable à des millions de points de stockage d’énergie dans un réseau électrique, tel que des chauffe-eaux, des chauffe-espaces, des batteries de véhicules électriques, etc. L’approche choisie dans le cadre de smartDESC était basée sur la théorie de la commande à champ moyen, qui tire profit de la prévisibilité associée au comportement global d’un grand nombre d’éléments homogènes à contrôler (par exemple, des millions de chauffe-eaux) afin que la commande finale soit aussi locale que possible, nécessitant seulement un minimum d’échange d’information entre le niveau local et un niveau plus global qui collige les statistiques sur le groupe et transmet aux contrôleurs locaux le comportement collectif désiré, par exemple un niveau d’énergie moyen pour la population ainsi que son évolution désirée au cours des heures à venir.

L’avantage majeur d’une telle approche est de réduire de façon drastique les besoins en télécommunications sur les réseaux de distribution, où il n’y a souvent qu’une bande passante très limitée, par exemple via un réseau de compteurs intelligents. De plus, une fois que ces millions de points de stockage agissent de manière cohérente, il devient possible de les utiliser pour augmenter la pénétration de sources de production renouvelables fluctuantes, tel que l’éolien et le photovoltaïque. Ceci requiert au préalable des prédictions de la production d’énergie à court terme, elle-même corrélée à des prédictions météorologiques, de même qu’une bonne connaissance des prédictions de consommation électrique des clients raccordés au réseau électrique dans lequel les points de stockage sont installés. C’est au niveau centralisé que ces informations sont traitées et servent à générer le comportement collectif désiré qui est transmis aux contrôleurs locaux via un réseau de télécommunications.

Dans le cadre de ce projet, tous les éléments requis pour réaliser une preuve de concept simulée de la commande à champ moyen d’une population de chauffe-eau installés dans un réseau de distribution électrique ont été développés. Ces éléments consistaient principalement en des développements de modèles des dispositifs de stockage (e.g. chauffe-eaux), des réseaux de télécommunications (réseau “mesh” de compteurs intelligents). Des développements mathématiques étaient aussi requis au niveau des algorithmes de commande eux-mêmes, ainsi que pour optimiser le comportement collectif global des éléments de stockage en fonction d’un objectif précis, e.g. aplanir la courbe de consommation électrique, maximiser la pénétration éolienne, etc. Tous ces développements ont ultimement pris la forme de codes informatiques dans divers environnements et langages (Java, C++, Fortran, etc.). Afin de permettre une interopérabilité de tous ces codes dans un espace de calcul commun, un simulateur global a dû être développé, sur la base de la plateforme multi-agents JADE.

Enfin, une extension au projet obtenue dans les dernier quatre mois de celui-ci a permis également de réaliser une plateforme physique pour montrer la faisabilité de l’implémentation matérielle (contrôleur physique agissant sur un chauffe-eau réel). Ce “noeud” physique a été monté de façon à pouvoir fonctionner comme un élément (agent) de la simulation, et donc en ce sens, il fait aussi partie de la simulation et de la preuve de concept simulée.

À ce jour, l’architecture de commande à champ moyen réalisée dans le cadre du projet smartDESC a été démontrée avec succès sur la base d’études de cas simulées. Les bénéfices escomptés en termes de comportement collectif des points de stockage et de faible largeur de bande requise ont pu être prouvés grâce au simulateur global. Le projet peut donc être considéré comme ayant été complété avec succès.

## Chapitre 2

# Définition et déroulement du projet

### 2.1 Objectif du projet

Le projet smartDESC avait pour objectif principal de développer une architecture de commande décentralisée des capacités de stockage d'énergie présentes dans un réseau électrique, mais géographiquement dispersées chez ses clients (par exemple : chauffe-eaux électriques, espaces climatisés, batteries de véhicules électriques hybrides, etc.) ou ailleurs dans le réseau. L'architecture proposée devait permettre de compenser les effets indésirables de la variabilité temporelle intrinsèque à la fois à la charge du réseau et à la composante renouvelable de la production d'électricité (éoliennes, énergie solaire). Il va sans dire que le confort des clients ne devait pas être affecté par cette gestion des points de stockage. À la fin du projet smartDESC, l'architecture de la commande finale devait être démontrée à travers différentes études de cas inspirées de données de réseau réelles, notamment 1) la capacité à lisser la courbe de consommation électrique, 2) la performance de la commande en cas de reprise en charge (e.g. suite à un black-out), et 3) l'équilibrage de la production éolienne avec la consommation du réseau électrique.

Pour arriver à ces fins, le projet a été divisé en plusieurs étapes de développement, notamment : (i) la modélisation du comportement individuel des charges d'intérêt (principalement des chauffe-eaux pour la preuve de concept) et de leur comportement agrégé, (ii) la génération par programmation mathématique du comportement moyen désirable pour ces charges dans un objectif de compensation des sources de variabilité dans la production ou la charge du réseau, (iii) l'implantation par la théorie des champs moyens d'une commande décentralisée permettant de réaliser le comportement collectif désiré, (iv) la validation de l'approche au moyen d'un simulateur global permettant : 1) d'estimer les gains additionnels rendus possibles au niveau de la pénétration des énergies renouvelables, et 2) de tester les capacités de réaction de l'architecture à des événements imprévus.

L'aspect financier (tarification variable de l'énergie en fonction du temps) ne faisait pas partie de l'approche smartDESC, mais il serait possible d'intégrer cet aspect dans le futur si le besoin se présentait.

### 2.2 Raison pour laquelle le projet était nécessaire

Le besoin de produire davantage d'électricité à partir de sources renouvelables est unanimement reconnu à l'échelle internationale. Il s'agit aussi pour le Canada d'un élément important dans sa planification énergétique, étant donné l'étendue de son territoire, qui implique un grand potentiel de développement de la filière des énergies renouvelables. Cependant, mis à part le cas de l'hydro-électricité, qui est une source de production très stable en raison de la grande quantité d'énergie stockée dans des réservoirs d'eau, la difficulté majeure associée à l'intégration de source d'énergies renouvelables sur des réseaux électriques est leur variabilité dans le temps. En effet, on ne peut jamais garantir qu'à un instant donné, la puissance requise par les centres de consommation puisse être assurée uniquement par des sources d'énergie renouvelables. L'intérêt de pouvoir stocker l'énergie renouvelable produite au moment où elle est disponible est donc au premier plan d'une stratégie énergétique basée sur des sources d'énergie renouvelables.

Comme le stockage à grande échelle d'énergie électrique demeure difficile en proportion du niveau élevé de consommation, une approche possible est de décentraliser au maximum le stockage de l'énergie en exploitant autant que possible le potentiel de stockage existant déjà chez les clients, en particulier l'énergie thermique qui est stockée dans un chauffe-eau électrique ou même dans les bâtiments eux-mêmes (les meubles, murs, etc. accumulent aussi de l'énergie thermique) [Hughes, 2010]. Le nombre de points de stockage à contrôler devient cependant rapidement très grand, ce qui exige un schéma de commande non conventionnel pour tirer le maximum de ce potentiel de stockage

inhérent aux clients des réseaux électriques. Le défi est encore plus grand si l'on exige que cette gestion du stockage soit complètement transparente au niveau du confort des clients.

La plupart des approches conventionnelles de gestion de la charge, et par extension, de gestion du stockage distribuée d'énergie dans un réseau électrique, sont des approches dites "centralisées", c'est-à-dire que la commande des charges repose sur un signal qui vient d'un ordinateur central et qui doit être actualisé régulièrement, sur la base d'une rétroaction intensive qui fournit l'état des charges contrôlées à l'ordinateur central. Ceci se fait au prix d'un besoin substantiel en bande passante de télécommunications qui empêche la généralisation de telles commandes à de très grands systèmes. Si la bande passante est limitée, on doit alors en général faire des compromis sur le taux de rafraîchissement des informations, ce qui a un impact notable sur 1) le confort du client (indisponibilité accrue d'eau chaude, etc.), et/ou 2) la performance générale du système en terme d'intégration des renouvelables (moins grande pénétration d'éoliennes, etc.).

Dans ce contexte, il y avait donc nécessité d'explorer des avenues qui permettent de réaliser la commande de millions de points de stockage distribués dans un réseau électrique, sans pour autant faire croître le besoin en télécommunications de façon démesurée, et en assurant à tout moment la satisfaction du confort des clients. Le projet smartDESC a permis de démontrer que la théorie de la commande à champ moyen, lorsque appliquée à ce problème particulier, constitue une solution possible.

## 2.3 Identification et sollicitation des partenaires

Au moment de monter le projet en 2012, le promoteur avait identifié un certain nombre de partenaires, le principal étant Hydro-Québec, qui travaillait alors à l'élaboration d'une stratégie de gestion de la charge domestique pour aider l'entreprise à réduire sa pointe de consommation électrique en hiver. Plus particulièrement, l'expertise du Laboratoire sur les Technologies de l'Énergie (LTE) de l'IREQ (Institut de Recherche d'Hydro-Québec) en matière de modélisation des éléments de stockage d'énergie s'est avéré être un atout majeur dans le cadre du projet smartDESC. Des échanges entre le chercheur du LTE et l'équipe de projet smartDESC ont permis d'accélérer substantiellement la phase de développement et validation des modèles, plus particulièrement les modèles de chauffe-eaux et les modèles de processus de tirage d'eau chaude par des clients résidentiels. D'autres discussions avec le LTE, l'IREQ et Hydro-Québec Distribution ont aussi permis d'élargir la portée potentielle de l'architecture proposée dans smartDESC, et surtout, de bien définir les études de cas qui ont servi à réaliser la preuve de concept simulée.

Parmi les autres partenaires, mentionnons WPred inc., une entreprise qui réalise des prédictions de la production éolienne dans un territoire géographique donné à partir de données météo publiques disponibles chez Environnement Canada. Également, l'entreprise Artelys a développé pour l'équipe smartDESC un module de prévision de consommation électrique basé sur l'historique de consommation des années précédentes. Enfin, la Coopérative St-Jean-Baptiste [Coop, 2016], qui est un petit distributeur d'électricité privé situé en Montérégie, a gracieusement fourni des données de consommation électrique de son réseau de 6000 clients sur une période de deux ans (données anonymes bien sûr), ce qui a permis de monter les études de cas de smartDESC sur la base de données réelles (et réalistes). Les contributions combinées de WPred, Artelys et de la Coop ont ainsi permis le développement des études de cas impliquant de l'équilibrage éolien sur un réseau électrique, soit le cas le plus important pour réaliser la preuve de concept visée par smartDESC, i.e. la possibilité d'intégrer davantage d'énergies renouvelables dans le réseau électrique grâce à une commande décentralisée basée sur la théorie des champs moyens.

Enfin, en toute fin de projet, la compagnie SG2B (Smart Grid to Business), qui offre des services de consultation dans le domaine du "smart grid", a offert son aide à l'équipe de projet pour planifier la fabrication d'un contrôleur physique de chauffe-eau, ainsi qu'une plateforme de test réelle de chauffe-eau contrôlée par une commande à champ moyen, et reliée au simulateur global développé dans le cadre du projet.

Des contacts ont aussi été établis avec des manufacturiers majeurs d'équipements électriques avant et pendant le projet, mais comme la finalité du projet smartDESC était d'arriver à une preuve de concept simulée, et non pas au développement d'équipements commerciaux, la contribution de ces entreprises s'est limitée à des recommandations générales visant à mieux planifier une éventuelle phase de développement technologique.

Tout au long du projet, le promoteur a pu sans difficulté trouver des partenaires adéquats pour compléter le spectre d'expertise requis pour réaliser la preuve de concept de la commande champ moyen.

## 2.4 Difficultés rencontrées

Le projet a été mené en milieu universitaire, ce qui impliquait la participation un certain nombre d'étudiants de maîtrise et de doctorat, parfois difficiles à recruter. Cependant, dans le cas présent, ce recrutement en début de

projet s'est très bien déroulé, de même que celui de deux associés de recherche, l'un dédié au travail de fond sur la théorie des champs moyens, et l'autre sur l'implémentation du simulateur global. Mis à part le fait que le choix d'architecture du simulateur global ait été plus long à faire que ce qui avait été prévu au départ, le déroulement du projet a été conforme à la planification initiale, et les résultats sont exactement au point attendu au terme des 42 mois de projet.

## Chapitre 3

# Sommaire des développements

### 3.1 Aperçu général

Le coeur de l’architecture de smartDESC repose sur une commande à champ moyen. Celle-ci se base sur la théorie des jeux à champ moyen, introduite en 2006<sup>1</sup>, comme limite de jeux non coopératifs à un grand nombre de joueurs [Lasry and Lions, 2007]. 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).

Dans le contexte du projet smartDESC, ces “joueurs” sont remplacés par des couples chauffe-eaux/contrôleurs, mais la théorie reste la même. Grâce à la théorie des jeux à champ moyen, il est possible de contrôler une grande population de chauffe-eau de manière optimale en limitant les communications au strict minimum et ce, grâce à des calculs locaux anticipant le comportement du groupe. De plus, l’implantation décentralisée de la commande permet de garantir la possibilité de non contribution à un moment donné si la commande calculée venait à violer confort ou sécurité du client. La restriction de la commande à des chauffe-eaux n’a été faite que par souci de mettre le maximum de ressources du projet sur la preuve de concept. Ceci ne limite en aucun cas l’application de la commande à champ moyen à d’autres types d’éléments de stockage, tel que le chauffage des immeubles, les batteries de véhicules électriques, etc.

Pour démontrer la faisabilité et les bénéfices d’un tel contrôle décentralisé à grande échelle, le projet smartDESC a été segmenté en un certain nombre de tâches, les principales étant liées au développement de différents modules informatiques, notamment :

- un module de simulation numérique de la physique des chauffe-eaux [Solis, 2015],
- un module d’optimisation du profil agrégé de la consommation électrique,
- un module de contrôle local des chauffe-eaux basé sur la théorie des jeux à champ moyen,
- un module de simulation d’un réseau de télécommunications de type mesh basé sur les compteurs intelligents tels que ceux installés par Hydro-Québec (ainsi que plusieurs autres compagnies d’électricité),
- un module de simulation multi-agent basé sur l’outil JADE (Java Agent DEvelopment Framework).

C’est le module de simulation multi-agents qui a permis d’intégrer dans un environnement unique l’ensemble des autres modules. Une fois cette intégration complétée, des études de cas ont pu être montées et ont permis de tirer des conclusions sur les performances de la commande à champ moyen.

Enfin, dans les derniers mois du projet, un chauffe-eau réel commandé par un prototype physique de contrôleur à champ moyen a été mis en place afin de démontrer la faisabilité de la réalisation concrète du concept.

Ce chapitre présente un sommaire des principales réalisations associées aux tâches énumérées ci-dessus. Le chapitre suivant présente les résultats associés aux études de cas.

### 3.2 Développement des modules et intégration dans le simulateur

Chaque sous-section présentée ici commence par une présentation des principes théoriques associés au module considéré, puis se termine par des informations pratiques sur la mise en place du module dans le simulateur.

---

1. Le Professeur Roland Malhamé, l’un des deux chercheurs principaux de ce projet, en est l’un des pionniers.

## 3.2.1 Module de simulation numérique de la physique des chauffe-eaux

### Principes théoriques

Le chauffe-eau (ou ballon d'eau chaude) est un appareil électroménager universellement répandu. Sa fonction principale est de chauffer une réserve d'eau chaude afin qu'elle soit disponible en permanence pour les usagers de la maison. C'est donc un excellent moyen de stocker de l'énergie thermique, et surtout, si on s'y prend bien, un moyen de stocker cette énergie à un moment stratégique par rapport à l'offre et la demande d'énergie sur le réseau électrique.

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 : une ou deux résistances électriques sont plongées dans un réservoir 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.

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, afin de respecter cette dynamique, l'entrée d'eau froide est située au bas du chauffe-eau, tandis que la sortie d'eau chaude est située au haut de celui-ci.

Lors d'un tirage d'eau chaude, de l'eau froide est instantanément injectée au 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, on peut observer une stratification de l'eau dans le chauffe-eau. La partie inférieure et froide du chauffe-eau est ensuite réchauffée grâce à l'élément chauffant situé en bas du chauffe-eau.

La température des chauffe-eaux est aussi un élément critique pour la sécurité sanitaire de leurs utilisateurs. Si une eau excessivement chaude peut engendrer des brûlures, une eau trop tiède favorise le développement de bactéries au sein du chauffe-eau. Ainsi, la température doit être maintenue entre des bornes bien définies.

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  $60\text{ °C}$ ) et une zone de tolérance (*deadband*, habituellement  $\pm 3\text{ °C}$ ). Ainsi, lorsque la température de l'eau atteint la valeur de consigne moins la zone de tolérance ( $60 - 3 = 57\text{ °C}$ ) 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 ( $60 + 3 = 63\text{ °C}$ ), 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. Dans le mode thermostatique classique, l'élément du haut, plus près de la sortie d'eau chaude, a une priorité absolue sur l'élément du bas, de façon à assurer qu'il y ait toujours de l'eau chaude pour l'utilisateur.

### Aspects pratiques

La modélisation du chauffe-eau a été réalisée sous forme d'un code Java. Cette modélisation permet de simuler de manière fiable et réaliste le fonctionnement d'un chauffe-eau, tel que décrit ci-dessus. Elle est basée sur la segmentation du chauffe-eau en  $N$  couches horizontales ayant chacune une température uniforme et échangeant de la chaleur avec les couches supérieures, inférieures, les parois du chauffe-eau ainsi que les éléments chauffants, s'il y a lieu. Ce modèle de chauffe-eau est illustré à la figure 3.1. Un algorithme approxime aussi les mouvements de convection pour éviter que les couches inférieures ne deviennent plus chaudes que les couches supérieures, ce qui ne serait pas physique.

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

- 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  $1,31\text{ l/min}$  dans le cadre de cette étude.

Les chaînes de Markov ont été générées à partir de données provenant de relevés réels effectués par Hydro-Québec. 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 des taux de transition entre les deux états de tirage changent en fonction de l'heure du jour, pour reproduire les statistiques des processus réels d'extraction d'eau le plus fidèlement possible.

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 tirage individuels. Cette variété des scénarios existerait même si les paramètres des chaînes de Markov adoptés étaient communs à toute la population de chauffe-eau commandés.

Sous certaines hypothèses, cette modélisation du chauffe-eau permet d'obtenir des équations linéaires décrivant le fonctionnement thermique du chauffe-eau. La linéarité des équations constitue une condition nécessaire pour

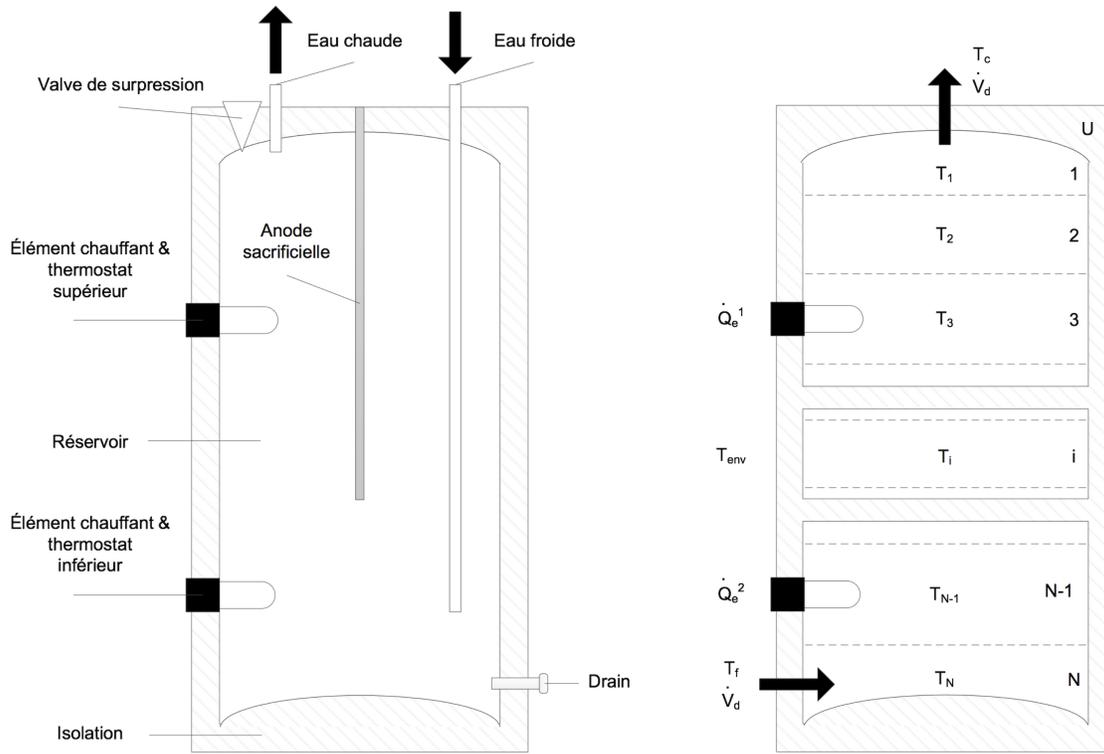


FIGURE 3.1 – Schéma d'un chauffe-eau et de son modèle à  $N$  couches.

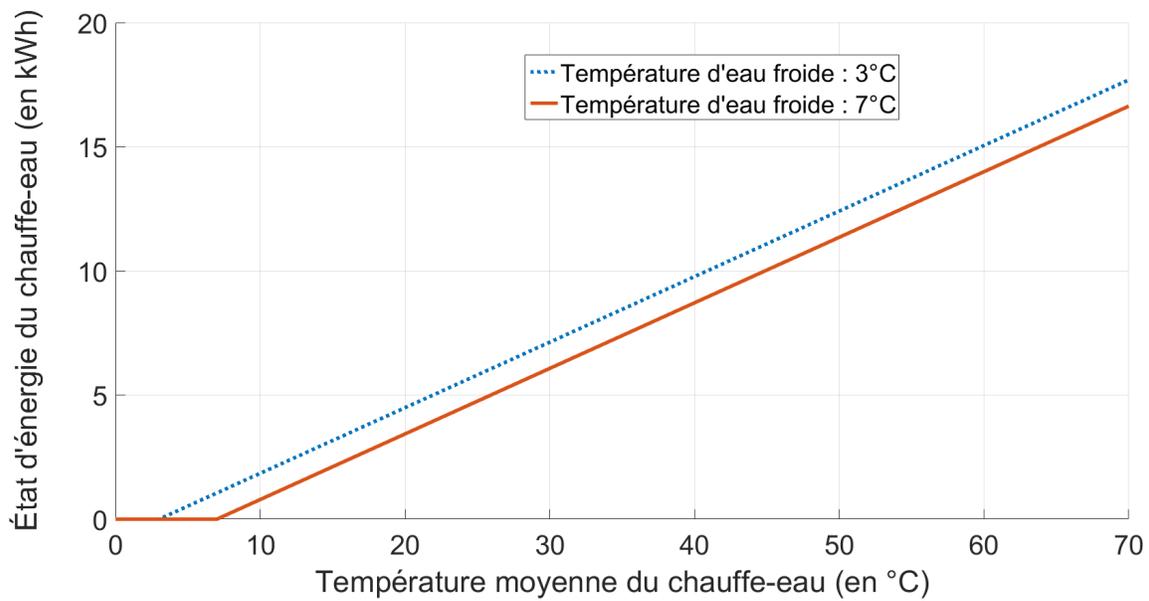


FIGURE 3.2 – État d'énergie d'un chauffe-eau de 60 gallons en fonction de sa température interne moyenne et de la température d'eau froide.

permettre une résolution analytique des équations de la commande à champ moyen (voir section 3.2.3).

Les équations de la thermique du chauffe-eau permettent aussi de lier la température moyenne du chauffe-eau à son état d'énergie. L'état d'énergie du chauffe-eau, exprimé en kWh, correspond à la quantité d'énergie injectée dans le chauffe-eau pour que celui-ci passe l'état "froid" (chauffe-eau rempli d'eau froide) à une température moyenne donnée. En d'autres termes, il s'agit de la quantité d'énergie stockée dans le chauffe-eau. La figure 3.2 présente cette relation entre la température moyenne du chauffe-eau et son état d'énergie pour deux températures d'eau froide différentes en entrée<sup>2</sup>.

Le module de simulation de chauffe-eau fonctionne de manière conjointe et en interaction avec le module "maison", décrit à la section 4.1 et modélisant la consommation électrique résidentielle complète, de même qu'avec le module de contrôle à champ moyen, décrit à la section 3.2.3. Le module de commande permet de déterminer la puissance à stocker dans le chauffe-eau au cours du prochain pas de temps de la simulation.

## 3.2.2 Module d'optimisation du profil agrégé de la consommation électrique

### 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 que le profil de charge soit le plus "lisse" et stable possible, de façon à ne pas devoir faire varier constamment le niveau de production, ce qui est difficile avec des centrales thermique ou nucléaires. Dans ce cas, à chaque pic de consommation, il est nécessaire de mettre en route des centrales dites "de pointe", souvent plus chères et plus polluantes que les centrales dites "de base". Inversement, lors des creux de consommation, il est nécessaire de régler les centrales de base en dehors de leur point de fonctionnement optimal. Cela a pour effet de diminuer leur rendement et d'augmenter les coûts de production. Même pour des centrales hydrauliques, qui sont plus flexibles dans leur mode d'opération, des ajustements trop fréquents usent les vannes qui contrôlent le débit d'eau. Un profil de consommation lisse est donc le scénario le plus économique pour un opérateur de réseau électrique avec des filières de production "classiques".

L'arrivée croissante des énergies renouvelables intermittentes (et donc non-contrôlables), tel que le solaire photovoltaïque et l'éolien, crée un stress et une variabilité encore plus grande sur les réseaux électriques, car l'adéquation entre la charge et la production devient encore plus difficile à respecter qu'avec les filières conventionnelles. Dans ce contexte, le fait d'avoir un certain contrôle du côté de la consommation (profil de charge agrégé) devient clairement un atout pour l'opérateur de réseau, puisque cela lui donne un degré de liberté de plus pour faire face à cette variabilité. Le gain permis par un tel contrôle est à la fois technique, en permettant la pénétration d'une plus grande proportion d'énergie renouvelable sans engendrer de perturbation dangereuse pour le réseau, et économique, en permettant de limiter la consommation lorsque l'énergie est plus chère à produire. Ces avantages sont pour le moment ressentis surtout par les distributeurs d'électricité, et généralement pas par leurs clients, à moins que les distributeurs n'offrent une tarification plus favorable aux clients participants.

Ceci dit, le projet smartDESC ne vise pas à faire des économies d'énergie chez le client, mais plutôt à réaliser un contrôle temporel du stockage d'énergie via les chauffe-eau des clients, de façon complètement transparente pour ceux-ci, tout en amenant un bénéfice substantiel aux distributeurs d'électricité au niveau des coûts d'opération et de la flexibilité d'exploitation de leur réseau. En d'autres termes, l'optimisation désirée ici vise à décaler dans le temps la consommation des clients associée aux chauffe-eaux, sans pour autant modifier leurs habitudes de consommation ni leur bilan énergétique net. En ce sens, le rôle de l'optimisateur est de produire une commande qui permette de lisser la charge au maximum du point de vue des centrales de production de grande taille (et à forte inertie), qu'il y ait ou non présence de production renouvelable sur le réseau. Dans le premier cas, on parlera d'équilibrage éolien, alors que dans le second cas, on parlera simplement de lissage du profil de consommation.

### Aspects pratiques

Dans le cadre du projet, un algorithme d'optimisation du profil de consommation pouvant satisfaire différents critères (lissage de charge, équilibrage éolien, etc.) a été développé en langage C++. L'algorithme requiert en entrée une prédiction de la charge non-contrôlable (incluant ou non la production d'énergie renouvelable), et produit en sortie une "trajectoire" à suivre pour le niveau d'énergie moyen (ou de façon équivalente, une température moyenne) de l'ensemble des chauffe-eaux de la population contrôlée. Dans sa forme la plus simple, l'optimisation est dite "déterministe", c'est-à-dire qu'elle se base sur une prédiction du futur qui est considérée parfaite. Une autre version de l'optimisation dite "stochastique", qui prend en considération l'incertitude sur les prédictions futures, est présentée ci-dessous.

---

2. 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.

Dans tous les cas, l’algorithme fournit en sortie 24 températures moyennes (correspondant à des niveaux d’énergie de la population complète de chauffe-eaux), soit une température moyenne cible pour chacune des 24 prochaines heures. L’ensemble de la population doit atteindre à la fin de chaque heure la cible visée afin de réaliser l’optimisation désirée.

Dans les faits, pour arriver à ses fins, l’algorithme applique son optimisation sur un chauffe-eau hypothétique qui représente l’agrégat de tous les chauffe-eaux de la population contrôlée. Ce “méga-chauffe-eau” virtuel reçoit lui-même en entrée la somme des demandes de tirage d’eau chaude des chauffe-eaux individuels, en supposant que ce comportement agrégé est connu, par exemple suite à une campagne de mesures effectuée au préalable. Dans le futur, on pourrait envisager une distribution statistique auto-construite via l’observation de la charge par les contrôleurs locaux installés chez les clients. De plus, l’algorithme utilise en entrée un certain nombre de paramètres, tels les caractéristiques physiques des chauffe-eaux, le nombre de maisons contrôlées, la température moyenne des chauffe-eaux au début de l’horizon de contrôle (qui peut 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 l’ensemble de ces données, l’optimisateur est en mesure de générer les 24 températures moyennes cible qui doivent être transmises à l’ensemble des chauffe-eaux contrôlés (voir figure 3.3).

L’algorithme est aussi capable de travailler en mode “stochastique”. Sachant que le principal aléa dans le cas stochastique est la prédiction à long terme des conditions météorologiques, l’algorithme prendra alors en entrée  $N$  scénarios météorologiques avec autant probabilités différentes de réalisation, plutôt qu’un seul scénario supposé connu et parfait. Ceci affecte particulièrement la puissance éolienne à venir dans les 24 heures couvertes par l’optimisation. De plus, si l’on avait considéré un modèle plus raffiné pour la consommation non-contrôlable, les prévisions de température auraient aussi un impact important sur celle-ci via les systèmes de chauffage/climatisation électriques présents dans les bâtiments.

L’optimisateur stochastique considère donc tous ces scénarios dans son calcul, en pondérant chacun d’entre eux par sa probabilité de réalisation. À la fin de l’optimisation, l’algorithme fournit une seule et unique consigne de 24 températures moyennes qui prend en considération l’incertitude de réalisation de chacun des  $N$  scénarios proposés. Bien que la solution ainsi obtenue soit moins parfaite que celle obtenue pour un seul scénario futur parfaitement connu, elle devrait permettre une plus grande immunité face aux écarts qui pourraient survenir entre les prévisions et la réalité.

En terme de raccordement au simulateur global, le programme d’optimisation se présente comme 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 multi-agents (codé en JAVA) grâce à l’interface multi-langage JNA (Java Native Access).

Enfin, il faut préciser qu’au début de chaque jour, ou à chaque fois que cela est jugé nécessaire, par exemple, lorsque qu’un imprévu écarte la réalité de la prédiction, il devient important de générer une nouvelle commande pour éviter une erreur accumulée trop importante au niveau des contrôleurs locaux. Dans ce cas, l’algorithme

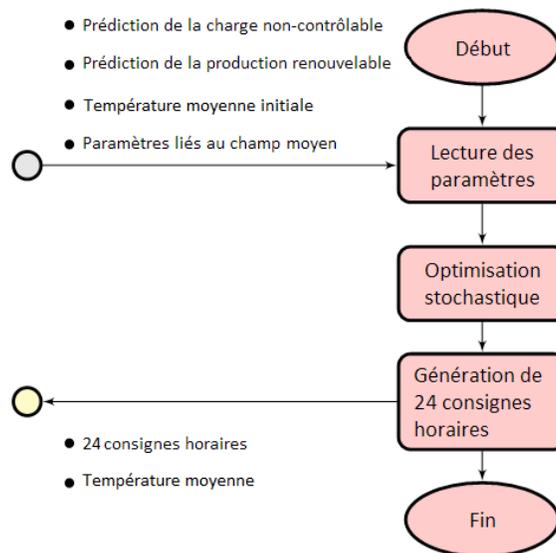


FIGURE 3.3 – Représentation en schéma-bloc de l’algorithme d’optimisation de la charge

d’optimisation est appelé de nouveau avec les différents paramètres évoqués ci-dessus afin de calculer une trajectoire qui correspond mieux à la nouvelle réalité. Le code fournit alors 24 nouvelles consignes de température qui sont transmises à l’ensemble des chauffe-eaux connectés. Ces consignes sont reçues et traitées par le contrôleur champ moyen (contrôleur local), qu’il convient à présent d’introduire plus en détails. Ainsi, l’optimisateur opère sur un horizon glissant et remet à jour ses calculs à chaque heure lors d’arrivée d’informations plus à jour.

### 3.2.3 Module de contrôle local à champ moyen

#### Principes théoriques

Tel que mentionné à la section 3.2.1, en date de 2016, le contrôle de la puissance injectée dans la plupart des chauffe-eaux se fait de manière purement thermostatique, c’est à dire que le chauffe-eau consomme de la puissance du réseau électrique dès qu’il commence à se refroidir, sans égard au reste de la consommation sur ce même réseau. Le contrôleur à champ moyen développé dans le cadre du projet smartDESC a pour vocation de se substituer au contrôleur thermostatique classique. Il doit être capable de recevoir et d’interpréter la commande globale transmise par l’algorithme d’optimisation décrit à la section 3.2.2, et de l’appliquer localement sans nécessité de communication avec le niveau supérieur, et ce, jusqu’au prochain rafraîchissement d’informations.

Si on reprend les explications présentées dans la mise en contexte du projet, l’objectif de smartDESC est de montrer que l’on peut fournir une commande individuelle à chaque chauffe-eau qui n’utilise qu’un minimum de bande passante en termes de télécommunications, tout en respectant le mieux possible le confort des usagers. Ainsi, la “trajectoire” calculée et envoyée aux contrôleurs locaux par l’optimisateur du profil de charge est commune à l’ensemble des chauffe-eaux, mais elle est interprétée localement par le contrôleur champ moyen, de façon individualisée pour chaque chauffe-eau, en fonction du contexte local. De cette façon, en suivant les principes de la théorie des jeux à champ moyen [Huang et al., 2006], on s’assure que, pour un ensemble suffisamment grand (au sens statistique) d’individus contrôlés, la trajectoire de la moyenne des températures du parc de chauffe-eaux converge vers la trajectoire de groupe fournie par l’optimisateur.

Chaque contrôleur à champ moyen se présenterait en pratique comme un boîtier “intelligent” relié aux éléments chauffants du chauffe-eau qu’il commande ainsi qu’à un réseau de télécommunications. À partir des informations reçues du niveau supérieur par l’optimisateur et de l’état thermique courant du chauffe-eau, son rôle est de générer une loi de rétroaction sur le vecteur d’état local du chauffe-eau en fonction du temps pour chacun des deux éléments chauffants. En d’autres termes, le contrôleur à champ moyen traduit en temps réel la consigne de température moyenne du groupe exprimée sous forme de 24 températures horaires en une séquence localement calculée de lois de rétroaction à appliquer à chaque élément chauffant d’un chauffe-eau commandé.

La capacité du contrôle en champ moyen à générer une commande individuelle et localement adaptée à la fois à l’état et aux paramètres dynamiques d’un chauffe-eau est l’un des points forts du concept. En effet, il faut bien comprendre que le contrôleur central ne fournit pas une consigne individuelle aux contrôleurs locaux, mais seulement des informations très sommaires sur le comportement moyen désiré pour le groupe. C’est localement que la consigne individuelle est générée et adaptée à la situation de chaque chauffe-eau. Il n’est pas trivial de parvenir à faire une telle décentralisation du contrôle sans avoir d’effets secondaires indésirables.

La notion de justice (ou équité) est très présente dans l’algorithme de contrôle à champ moyen. En effet, la structure des coûts individuels dans le jeu est telle que les chauffe-eaux les plus froids participent moins que les chauffe-eaux les plus chauds aux efforts de réduction de la pointe (et inversement pour le remplissage des creux de consommation). On remarquera aussi que l’état énergétique relatif des chauffe-eaux les uns par rapport aux autres varie en permanence lors des simulations (voir section 4.2.2). 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. Sur une longue période, un certain équilibre est préservé dans les contributions envers l’objectif commun.

Pour arriver à ses fins, le champ moyen doit préserver une certaine variance de la température moyenne de chacun des chauffe-eaux par rapport à la température moyenne du groupe. Ceci est crucial en vue d’éviter des déplacements trop importants et inefficaces de températures des chauffe-eaux auxquels il serait tout le temps imposé d’aller vers la température moyenne recherchée pour le groupe.

À l’heure actuelle, l’algorithme de commande champ moyen qui a été implémenté ne peut fonctionner qu’avec des trajectoires constante par morceaux. La conséquence de ceci est que les sauts dans la température moyenne cible à chaque nouvelle heure peuvent engendrer de petits pics de consommation à l’échelle du réseau global, le temps que la transitoire soit passée (quelques minutes). Afin de régler ceci, il faudrait développer les formules qui permettent une trajectoire lisse par segment linéaires et continus d’un intervalle à l’autre (travail futur). Entre-temps, pour atténuer le problème, l’algorithme à champ moyen réalise une interpolation linéaire de la commande horaire en une commande par paliers qui change aux 15 minutes. Ceci permet de lisser quelque peu la commande en puissance en

réduisant l'amplitude des sauts entre deux paliers (4 petits sauts par heure plutôt qu'un grand saut horaire).

### Aspects pratiques

Comme pour l'algorithme d'optimisation de la charge, le module du contrôleur à champ moyen se présente comme une bibliothèque partagée Linux codée en C++ et 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 loi de commande optimale à suivre pour le chauffe-eau qui leur est associé.

À chaque pas de temps de la simulation, le chauffe-eau interroge le contrôleur champ moyen sur la puissance qu'il doit injecter dans chaque élément chauffant. À partir de l'information sur la trajectoire désirée du groupe, du vecteur de températures dans les différentes strates du chauffe-eau, et de la présence ou non d'un tirage d'eau, le contrôleur décide de la puissance électrique totale que devra consommer le chauffe-eau (voir figure 3.4).

Enfin, de manière aléatoire et suivant une loi de Poisson (probabilité uniforme dans le temps), les contrôleurs transmettent au niveau supérieur (i.e. à l'ordinateur central) leur température moyenne. Cet échantillonnage aléatoire permet à l'algorithme d'optimisation de maintenir à jour son échantillon de la population et ainsi corriger son estimé de la distribution statistique de la population complète. Selon les expériences réalisées dans le cadre du projet, il semble qu'il faille considérer en moyenne 4 remontées de température par chauffe-eau par jour pour maintenir une information globale statistiquement représentative de la réalité, et ce, pour une population de chauffe-eaux de quelques milliers seulement.

À ce jour, la durée du calcul associé à l'algorithme à champ moyen est de 1 à 10 secondes par contrôleur local sur un processeur de 3 GHz. Dans les faits, ceci est beaucoup plus rapide que réellement nécessaire, puisqu'une fois le calcul complété, le processeur du contrôleur local n'a que très peu à faire. En d'autres termes, il ne serait pas nécessaire d'avoir un micro-contrôleur très performant pour mettre en oeuvre le concept.

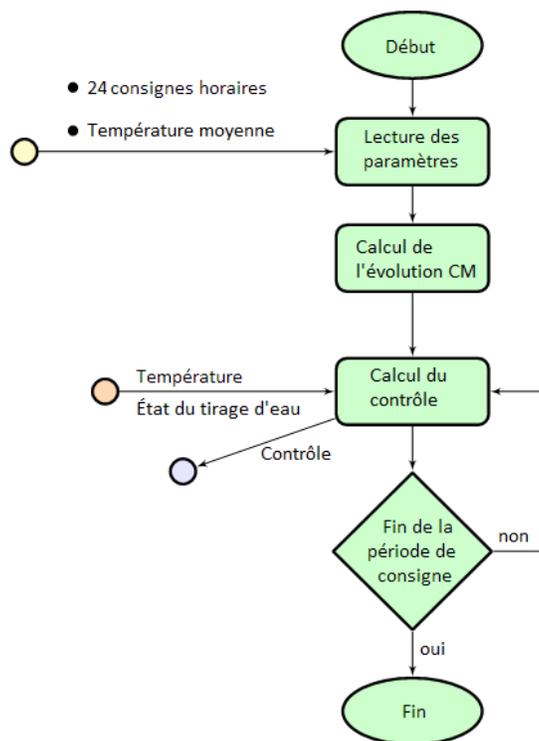


FIGURE 3.4 – Représentation en schéma-bloc de l'algorithme de contrôle en champ moyen.

### 3.2.4 Module de simulation d'un réseau de télécommunications de type "mesh"

#### Principes théoriques

Les simulations de contrôle de la charge ne sauraient être pleinement réalistes si elles n'incluaient pas une dimension propre au réseau de télécommunications 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 fait afin de reproduire le fonctionnement des compteurs d'électricité installés par certaines compagnies d'électricité en Amérique du Nord, notamment Hydro-Québec. Ainsi, il est établi que chaque maison joue le rôle d'un noeud du maillage de télécommunications, et 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.

#### Aspects pratiques

Dans le simulateur, le réseau de télécommunications est le centre névralgique du lien entre les différents agents. À chaque pas de temps, les agents envoient au module de télécommunications les messages qu'ils ont besoin de transmettre ainsi que les destinataires correspondants. Le module de télécommunications réalise alors une simulation indépendante de la simulation énergétique, avec un pas de temps beaucoup plus fin (propre au monde des télécommunications, i.e. de l'ordre de la milliseconde plutôt que des minutes), afin de simuler le transfert des messages depuis leurs noeuds de départ jusqu'aux noeuds d'arrivée.

La simulation des télécommunications 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 (énergétique). En d'autres termes, il y a toujours deux simulations qui tournent conjointement, soit :

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 des phénomènes liés 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 sont simultanées, synchrones et cohérentes. Les deux réseaux ont une topologie différente de connexion entre les agents. 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 l'architecture du réseau de télécommunications, qui ici est directement à la position géographique des maisons, là où sont installés les compteurs intelligents.

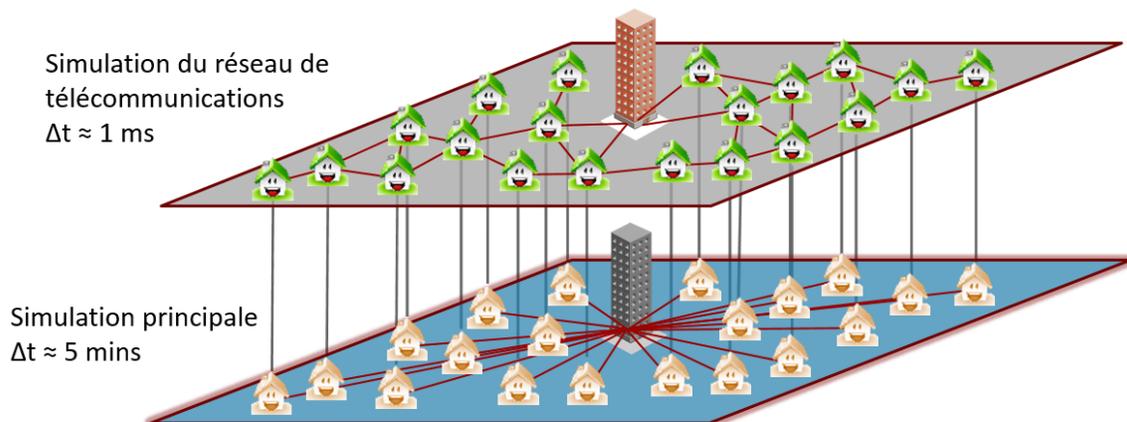


FIGURE 3.5 – Représentation schématique des deux niveaux de simulation qui se réalisent simultanément, soit la simulation énergétique (bas) et la simulations des télécommunications (haut).

### 3.2.5 Module de simulation multi-agents (simulateur global)

Ce dernier module, appelé simulateur global dans le cadre du projet smartDESC, est beaucoup plus générique que les modules spécialisés présentés ci-dessus. Il s'agit en fait d'un code basé sur l'environnement JADE (Java Agent DEvelopment Framework), conçu pour implémenter des systèmes multi-agents. Dans le cas présent, les agents sont les modules spécialisés présentés ci-dessus, répétés en nombre d'exemplaires suffisants pour modéliser le système désiré. Ces agents sont les acteurs de la simulation, et ils utilisent les mécanismes fournis par JADE pour interagir les uns avec les autres.

Dans cette section, le fonctionnement global du simulateur comportant tous les modules décrits ci-dessus est présenté. La figure 3.6 représente l'architecture logicielle du simulateur. On y voit bien l'ensemble des différents modules, de même que le liens existants entre chacun d'eux.

En haut de la figure, on retrouve 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 ;
- 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 sauvegarde et de journal ("log") de la simulation.

On retrouve ensuite les couples Maison/Chauffe-eau, avec une multiplicité  $N$  allant de 1 à 10 000<sup>3</sup>. 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 d'informations de nature électrique ne transite pas par le réseau de télécommunications. Elle utilise un lien direct via les

3. 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 couplage avec un système de base de données devrait permettre d'accroître cette valeur.

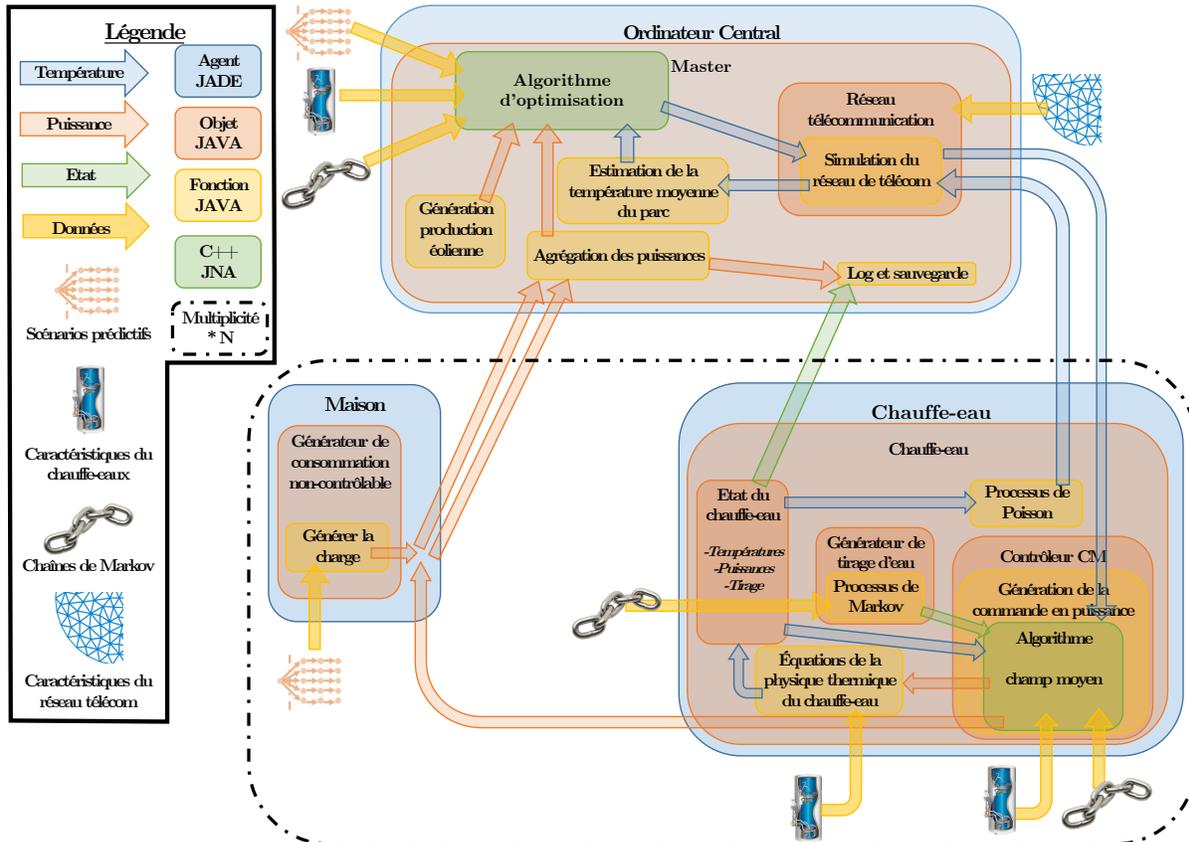


FIGURE 3.6 – Schéma du simulateur global et des interactions entre les différents agents et modules à l'intérieur des agents.

mécanismes fournis par JADE.

L'agent "Chauffe-eau" regroupe les modules suivants :

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

Malgré la généralité de l'environnement JADE et la qualité d'implémentation du code JAVA requis pour gérer des simulations temporelles dans ce contexte, le fonctionnement cohérent de tous les modules ci-dessus a nécessité un travail substantiel. Cependant, en définitive, le simulateur réagit tel que prévu comme un système en boucle fermée : l'algorithme champ moyen trouve son accomplissement dans la réalisation des commandes générées par l'algorithme d'optimisation, et l'algorithme d'optimisation utilise l'algorithme champ moyen pour générer sa commande.

Bien qu'il ait été initialement visé d'amener le simulateur à un point de maturité tel que le code source puisse être publiquement partagé, il n'a pas été possible d'atteindre cet objectif. Mentionnons qu'entre le début du projet en 2012 et sa fin en 2016, la vision du simulateur a beaucoup évolué, de même que les bibliothèques et technologies informatiques sous-jacentes. Plutôt que de mettre un effort massif de mise à jour de code en fin de projet, il a été jugé plus important d'investir ce temps dans la réalisation d'une plateforme physique de chauffe-eau avec contrôleur à champ moyen (voir section suivante), dans le but de rendre le concept plus tangible pour l'industrie et ainsi stimuler le lancement d'une phase de *démonstration* du concept sur un parc de chauffe-eau réels. Néanmoins, le code du simulateur pourrait être partagé sur demande, sans aucune garantie de soutien technique puisque l'équipe de projet est désormais dissoute.

### 3.3 Développement d'une plateforme physique

Au cours des quatre derniers mois du projet, une plateforme physique a été mise en place. Celle-ci est constituée d'un chauffe-eau réel, d'un prototype physique de contrôleur à champ moyen et de divers dispositifs d'instrumentation (mesure du débit, mesure de tension, courant et puissance électrique, mesure de la température interne du chauffe-eau sur 10 couches, etc.). Cette plateforme physique avait pour but de :

1. vérifier le réalisme du modèle thermique du chauffe-eau ;
2. valider la faisabilité de réaliser physiquement le contrôleur local basé sur la commande à champ moyen ;
3. stimuler de l'intérêt industriel pour une phase de démonstration de la commande à champ moyen sur un véritable parc de chauffe-eaux.

Dans le contrôleur en tant que tel, un micro-contrôleur gère tous les aspects de la commande, recevant en entrée les informations (émulées) de l'ordinateur central, de même que les mesures locales de températures internes du chauffe-eau. Le micro-contrôleur peut retourner en sortie des informations pour l'ordinateur central au besoin, notamment la température moyenne mesurée (ou estimée) du chauffe-eau. Pour les besoins des essais, tous les échanges d'information se font via un réseau de télécommunications de type ethernet ou wifi. Aucun réseau de type "compteurs mesh" n'a été émulé sur la plateforme physique à ce jour. Mentionnons que le code du contrôleur à champ moyen utilisé dans le simulateur a été intégralement porté sur le micro-contrôleur.

Au niveau des éléments externes au contrôleur, on retrouve sur la plateforme une électro-valve permettant de simuler un tirage d'eau qui suit exactement le modèle en chaînes de Markov programmé dans le simulateur, avec débit constant pendant le tirage d'eau. De plus, un circuit électronique permettant de moduler la puissance électrique transmise aux éléments du chauffe-eau a été développé afin que l'application pratique de la commande à champ moyen respecte l'approche utilisée en simulation. Notons que les choix technologiques qui ont mené à la réalisation de la plateforme ne sont pas mentionnés ici en détails car certains aspects sont sujets à une protection de la propriété intellectuelle. Cependant, mis à part une sonde spéciale qui a dû être développée pour mesurer la température interne en 10 niveaux du chauffe-eau, tout le développement repose sur du matériel commercialement disponible. La figure 3.7 montre quelques photos de la plateforme physique juste avant sa mise en service.

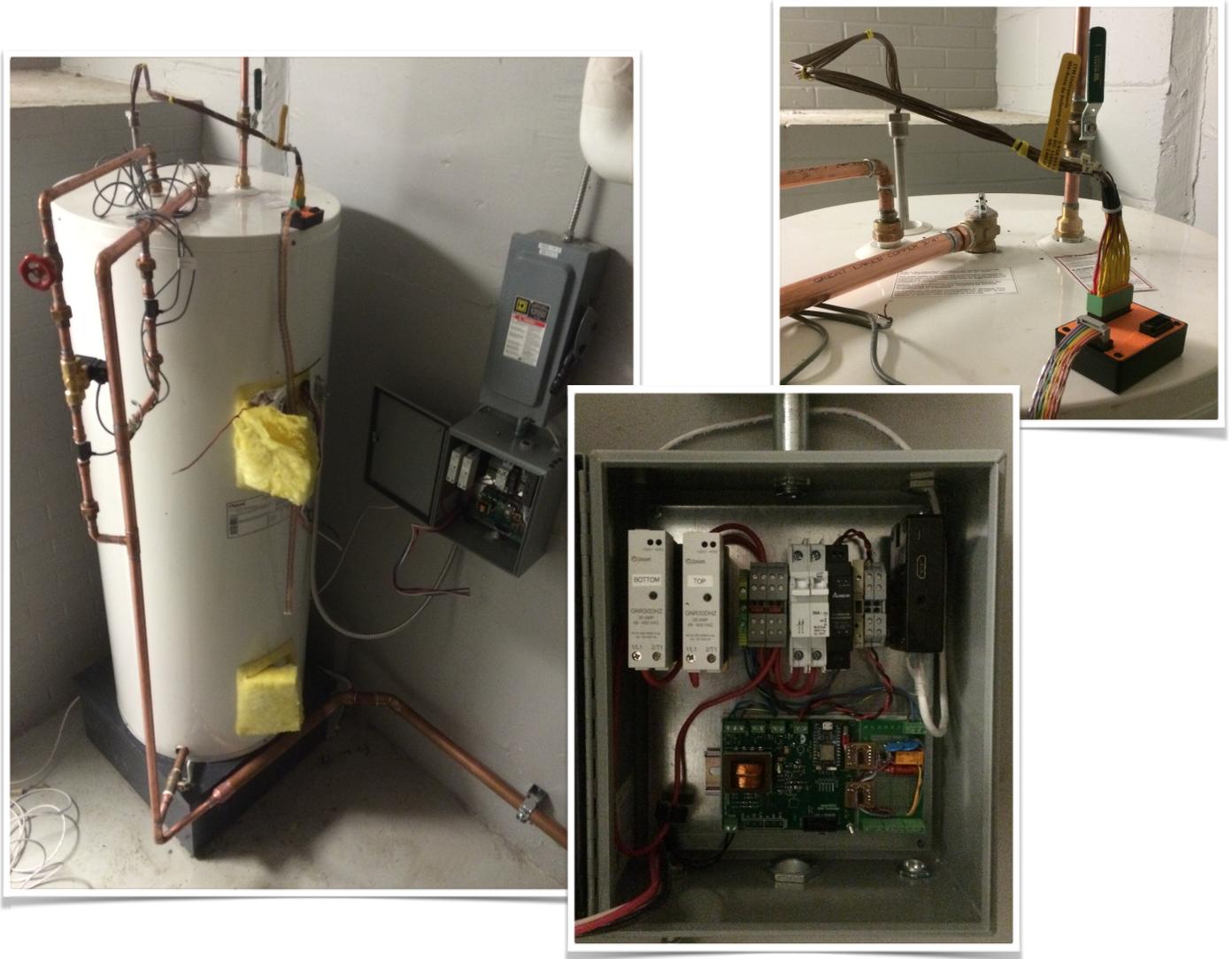


FIGURE 3.7 – Photos de la plateforme physique installée à Polytechnique Montréal permettant de tester l'implémentation matérielle du contrôleur à champ moyen sur chauffe-eau réel. La plateforme est entièrement instrumentée, et le tirage d'eau est contrôlé par une électro-valve.

# Chapitre 4

## Sommaire des résultats

### 4.1 Mise en place des études de cas

#### 4.1.1 Hypothèses de travail

Toutes les études de cas développées dans le cadre de ce projet ont été basées sur les données de consommation électrique fournies par la Coop St-Jean-Baptiste. Ces données ont été utilisées pour identifier l'allure de la puissance électrique consommée par un bassin de 6000 clients pendant une période de deux ans. Un traitement préalable des données a été fait pour retirer les clients qui ne sont pas représentatifs de l'échantillon résidentiel, notamment des fermes, des commerces et quelques industries.

Une fois ce traitement complété, il a été nécessaire de séparer la partie de la consommation appartenant aux chauffe-eaux, appelée ici "charge contrôlable" du reste de la consommation, appelée "charge non-contrôlable", qui regroupe l'ensemble des autres appareils électriques des maisons<sup>1</sup>. Cette désagrégation de la charge domestique a été faite en utilisant les statistiques de tirage d'eau chaude fournies par Hydro-Québec combinée à l'utilisation du simulateur de chauffe-eaux, le tout via une routine spéciale écrite en java dans le simulateur global. Bien qu'imparfaite, cette séparation *a posteriori* de la charge a permis de réaliser la preuve de concept qui est présentée dans ce chapitre.

Dans la réalité, les maisons sont alimentées en électricité via un réseau de distribution électrique (réseau à moyenne tension, e.g. 12 à 25 kV), lui-même alimenté à partir d'un réseau à haute tension (>60 kV) via un poste de transformation électrique. Dans les faits, les maisons ne sont pas raccordées au réseau moyenne tension directement, mais plutôt à un réseau basse tension local (120/240 V en Amérique du Nord). Dans le contexte de ce projet, il a été choisi de modéliser le comportement individuel d'au moins une centaine de maisons, et d'au plus quelques milliers de maisons, de façon à 1) assurer une certaine diversité statistique de la charge globale, requise pour que la commande à champ moyen fonctionne bien, et 2) rester dans les limites des capacités du simulateur global, limité à environ 10 000 agents simultanés pour une opération sur une seule machine. Ce nombre de maison correspond approximativement à la charge électrique que doit alimenter en pointe d'hiver une ou quelques lignes de distributions issues d'un même poste électrique.

Afin de réduire la complexité du modèle et de mettre l'effort de développement sur le coeur de l'innovation, il a été décidé de ne pas modéliser explicitement le comportement électrique du réseau de distribution. Comme celui-ci est généralement d'architecture radiale et relativement court en milieu urbain et semi-urbain, il a été jugé acceptable à ce stade de développement de négliger les chutes de tension et les pertes dans le réseau, et de considérer que la charge totale délivrée aux clients était égale à la charge mesurée en amont des lignes concernées. La puissance réactive sur le réseau et donc négligée pour les besoins de cette étude. Il serait simple d'ajouter un module de calcul des paramètres électriques du réseau dans le simulateur global. Ce simulateur existe déjà chez le promoteur, et il doit juste être interfacé correctement avec le simulateur pour être utilisé dans les études de cas.

Enfin, il convient de préciser que dans la suite de ce rapport, tous les résultats en puissance sont normalisés par le nombre de maisons afin de faciliter la comparaison des résultats entre les différents cas à l'étude. Ainsi, c'est la puissance moyenne consommée par maison, exprimée en kW/maison, que l'on montre dans tous les graphiques de puissance qui sont présentés dans ce chapitre.

---

1. Précisons que les termes "charge", "puissance" et "consommation électrique" sont strictement équivalents dans le contexte de ce rapport.

## 4.1.2 Aspects pratiques

Dans le simulateur, chaque agent “Maison” est un acteur indépendant et autonome de la simulation relié à un agent unique appelé “Ordinateur central” (ou “Master”) selon la figure 3.6, en plus d’être en relation avec un agent “Chauffe-eau”, tel qu’expliqué précédemment. De plus, une fonction génère de manière indépendante et aléatoire la charge non-contrôlable de la maison.

À chaque pas de temps de la simulation, chaque chauffe-eau simulé transmet sa consommation électrique à la maison qui lui est associée. La maison génère aussi sa propre charge non-contrôlable et transmet à l’ordinateur central la charge totale consommée (non-contrôlable + contrôlable), qui agrège toutes les consommations des maisons. Ce processus émule la mesure de puissance qui serait faite dans un poste électrique en temps normal, puisqu’il a été choisi de ne pas simuler explicitement le réseau électrique. Dans une implémentation physique de la commande à champ moyen, cette information sur les consommations individuelles ne serait pas envoyée à l’ordinateur central, mais seulement la mesure agrégée provenant du poste serait transmise. Afin d’émuler au mieux ce processus, l’ordinateur central dans la simulation ne travaille qu’avec la valeur de charge agrégée, représentant la consommation électrique totale de la population de maisons.

La charge non-contrôlable de la population est obtenue à partir de données réelles fournies par la Coop St-Jean-Baptiste. Pour cette étude de cas, nous utilisons la semaine du 1<sup>er</sup> janvier 2014 illustrée à la figure 4.1, qui correspond au pic de consommation de l’hiver 2014-2015. Ainsi, nous nous plaçons dans des conditions difficiles pour valider notre capacité de lissage.

## 4.2 Cas no.1 : lissage de la charge et optimisation déterministe

### 4.2.1 Considérations générales

La première étude de cas présentée ici a pour but de réaliser un lissage de la charge globale vue par le réseau électrique en utilisant la gestion du stockage d’énergie thermique dans une population de chauffe-eaux. Le réseau est constitué ici uniquement de charges résidentielles (maisons), tel qu’expliqué à la section précédente. Le schéma de commande utilisé est la commande à champ moyen, et l’optimisation est faite de façon déterministe. Par conséquent, au moment de réaliser le calcul des températures moyennes cibles, on suppose un scénario unique de consommation non-contrôlable pour les prochaines 24 heures.

Les simulations sont organisées selon la logique suivante :

- Un quart d’heure avant minuit, l’optimisateur global génère les températures moyenne cibles pour les 24 prochaines heures et les communique à l’ensemble des maisons via le système de télécommunications. La température moyenne du parc de chauffe-eau est aussi transmise aux maisons.

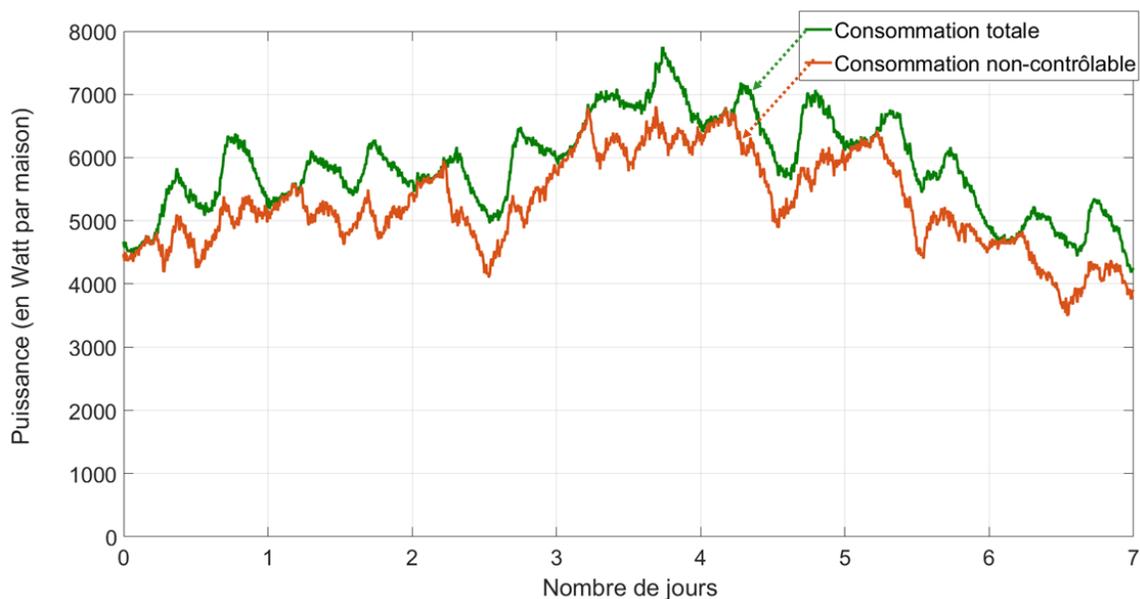


FIGURE 4.1 – Consommation non-contrôlable pour la semaine du 30 décembre 2013 au 5 janvier 2015.

- À minuit, le contrôleur champ moyen de chaque chauffe-eau analyse les données reçues et génère séquentiellement les lois de commande par rétroaction d'état pour les 24 heures à venir.
- À chaque pas de temps de la simulation (5 minutes ici) le contrôleur champ moyen de chaque chauffe-eau détermine la puissance à injecter dans le chauffe-eau<sup>2</sup> en fonction des lois calculées, de la température de chaque strate du chauffe-eau (estimée à partir de deux mesures seulement) et de l'état local de tirage d'eau chaude.
- Environ 4 fois par jour à des moments aléatoires, le contrôleur local du chauffe-eau transmet à l'ordinateur central la température moyenne de ce dernier via le système de télécommunications. Ceci permet de mettre à jour l'estimation de la température moyenne de la population, telle que transmise par le niveau supérieur, lors des calculs pour les heures subséquentes.
- Tous les modules décrits dans le chapitre précédent sont opérationnels pendant la simulation de l'étude de cas.

## 4.2.2 Résultats

### Comportement global de la commande à champ moyen

La figure 4.2 montre les différentes courbes de puissance d'intérêt suite à l'application de la commande à champ moyen dans l'étude de cas no. 1 sur un parc de 400 maisons équipées de chauffe-eaux électriques. On y retrouve les courbes suivantes :

- en **bleu** : la consommation contrôlable, qui correspond à la consommation des chauffe-eaux équipés d'un contrôleur à champ moyen ;
- en **violet** : la courbe de consommation optimale, i.e. la cible visée par l'optimisateur déterministe en fonction des prédictions de consommation futures ;
- en **jaune** : la consommation totale des maisons équipées de chauffe-eaux avec contrôleur à champ moyen (ici la totalité des 400 maisons) ;
- en **vert** (à titre de base comparative) : la consommation totale des maisons en absence de tout contrôle (donc chauffe-eaux classiques avec contrôleur thermostatique).

Le contrôle à champ moyen montre clairement sa capacité à réduire à la fois les pics et les creux de consommation, et donc à réaliser un bon lissage de la charge. La courbe jaune, résultat de la simulation avec contrôle à champ moyen, 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

2. Note : la commande à champ moyen a été développée en supposant que la puissance des éléments chauffants peut-être modulée entre 0 et 100% de la puissance maximale d'un élément chauffant conventionnel.

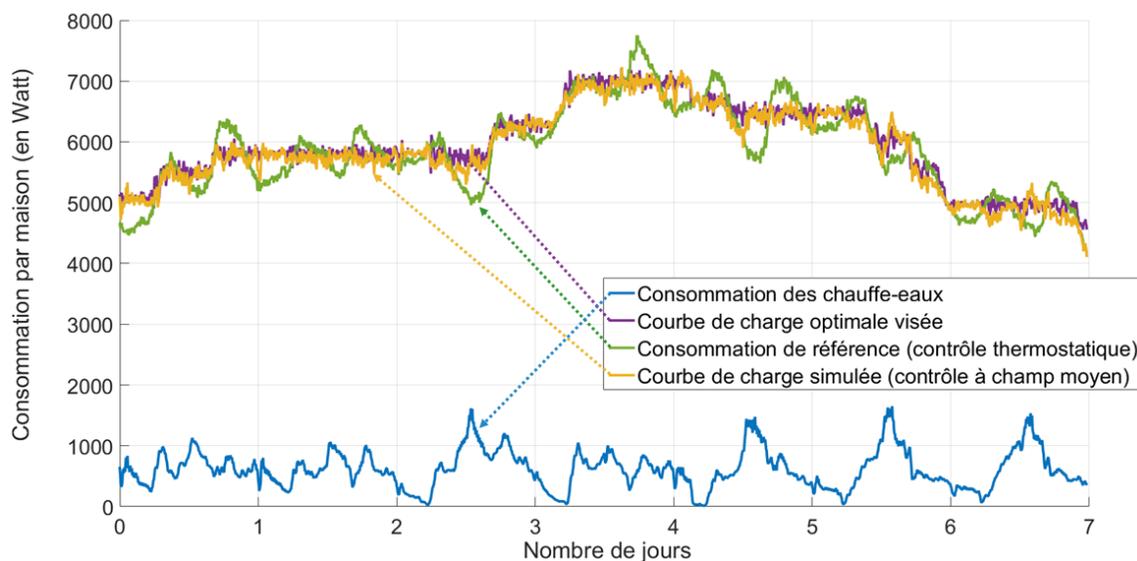


FIGURE 4.2 – Résultat de la commande à champ moyen pour l'étude de cas no. 1, appliquée sur une population de 400 maisons.

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 pour vocation de réguler ces fluctuations, mais plutôt de gérer la puissance sur une échelle de temps plus longue (de quelques heures à quelques jours).

Ainsi, avec la commande à champ moyen, le pic hivernal de 2014, qui a lieu durant la 3<sup>ème</sup> journée, passe de 7800 W à 7000 W par maison, ce qui représente une réduction de 800 W en absolu, ou 10% en relatif.

Il est important d’insister sur le fait que la marge de stockage d’énergie disponible dans les chauffe-eaux est limitée. En effet, la température des chauffe-eaux doit être maintenue entre 50 et 60°C. Par conséquent, l’optimisateur ne peut lisser complètement la charge sur un horizon de 24 heures : il retourne plutôt une optimisation par pallier qui suit la tendance générale de consommation de la journée.

### Température et puissance moyennes de la population de chauffe-eaux

La figure 4.3 représente le résultat de la simulation du point de vue thermique des chauffe-eaux. On y retrouve en rouge la cible de température moyenne calculée par l’optimisateur, et en bleu, la température moyenne simulée sur la population de 400 maisons toutes équipées d’un contrôleur à champ moyen. Sur chaque courbe, on représente un point toutes les 5 minutes.

Cette figure montre la très bonne capacité des contrôleurs champ moyen à suivre la cible de température moyenne lorsque celle-ci suit une trajectoire croissante (période de “mise en charge” du parc de chauffe-eaux). En revanche, un décrochage entre les deux courbes apparaît lorsque la température moyenne visée passe sous les 52°C. Deux facteurs expliquent ce décrochage :

- L’optimisateur central considère en tout temps une distribution normale de la population de chauffe-eaux autour de la température moyenne. Or cette approximation n’est valable que dans le domaine [52, 58]°C. Près des bornes 50 et 60°C, pour des raisons de sécurité et de confort des clients, le contrôleur local (champ moyen ou non) interdit les dépassements au-dessus de 60°C ou en-dessous de 50°C, résultat en une déformation de la présumée distribution normale, qui vient alors s’écraser sur ces bornes, biaisant ainsi les prévisions de

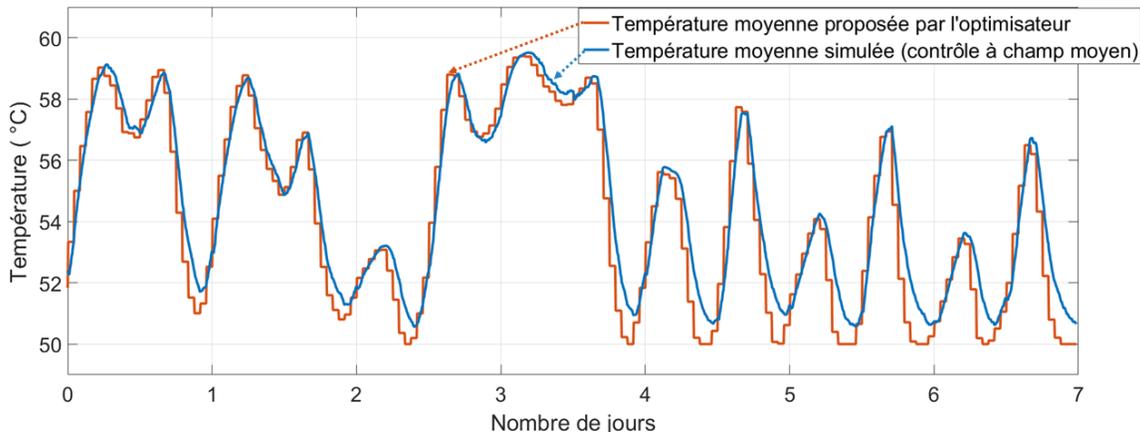


FIGURE 4.3 – Évolution de la température moyenne de la population de chauffe-eaux avec un contrôle champ moyen sur 400 maisons.

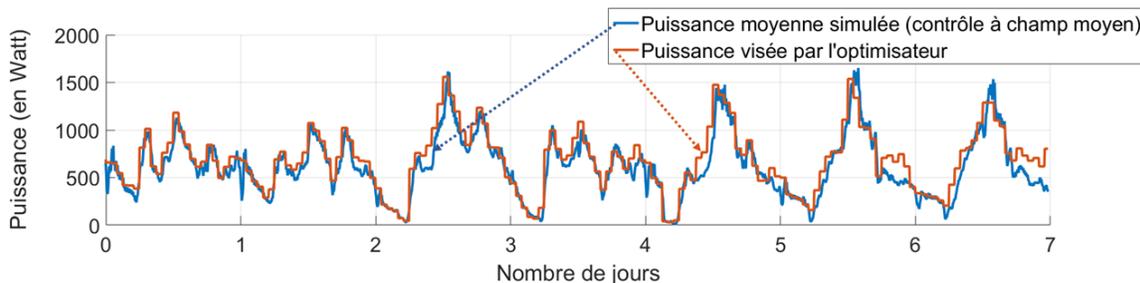


FIGURE 4.4 – Puissance moyenne consommée par la population de chauffe-eaux avec un contrôle à champ moyen sur 400 maisons.

l'optimisateur.

- Les mécanisme de réchauffement et de refroidissement des chauffe-eaux ne sont pas les mêmes. Lors d'un réchauffement, de la puissance est injectée dans le chauffe-eau, ce qui est toujours possible. À l'inverse, le refroidissement dépend du tirage d'eau chaude par les clients, donc d'un processus stochastique. Le contrôleur ne peut donc rien faire pour accélérer la décharge des chauffe-eaux si son rythme est inférieur à ce que l'optimisateur a prévu.

La figure 4.4 présente la puissance moyenne consommée par la population de chauffe-eaux lorsque celle-ci est soumise à la commande à champ moyen. Il est intéressant d'étudier cette figure de pair avec la figure 4.3. Notamment, on remarque à quel point les courbes de puissance optimale (rouge) et simulée (bleue) sont proches l'une de l'autre, ce qui démontre que le contrôle local réalise très bien son travail. Il ne faut pas oublier que ce contrôleur ne reçoit aucune consigne en puissance, mais uniquement la trajectoire de la température moyenne de la population de chauffe-eaux.

On note tout de même quelques décrochages, par exemple à la fin de la 5<sup>ème</sup> journée, qui sont liés à l'écart entre les températures moyennes désirées et réalisées par la commande (effet des bornes, tel que discuté ci-dessus). Des solutions sont en cours d'exploration pour améliorer la commande et/ou l'optimisation lorsqu'une portion non-négligeable de la population atteint les limites en température. La section suivante présente plus de détails sur la distribution de température au sein de la population de chauffe-eaux.

### Distribution de la température moyenne : équité entre les chauffe-eaux

Tel que présenté à la section 3.2.3, un des buts recherchés dans le contrôle à champ moyen est la particularisation d'une commande commune pour chaque chauffe-eau en fonction des contraintes et besoin locaux, tout en respectant une notion "d'équité" dans le parc contrôlé. En effet, le contrôle à champ moyen cherche à minimiser la perturbation qu'il pourrait engendrer sur la distribution statistique de la température moyenne des chauffe-eaux, en évitant par exemple d'amener l'ensemble de la population exactement à la même température. Autrement dit, le but est de garder en tout temps une variance significative autour de la température moyenne visée, afin d'éviter les effets de synchronisation des chauffe-eaux que l'on peut observer dans un contrôle plus classique (par exemple par délestage de charge).

La figure 4.5 présente la distribution thermique de la population durant les 7 jours de contrôle à champ moyen. On peut remarquer que la variance de la population reste toujours significative, i.e. la différence de température moyenne entre les chauffe-eaux les plus chauds et les plus froids reste grande en tout temps. De plus, la courbe des 10% des plus froids (en bleu foncé) ne passe jamais sous la barre des 48°C pour l'algorithme à champ moyen utilisé ici, et le nombre de clients insatisfaits est essentiellement nul sur les 8 jours de simulation réalisés, i.e. aucun

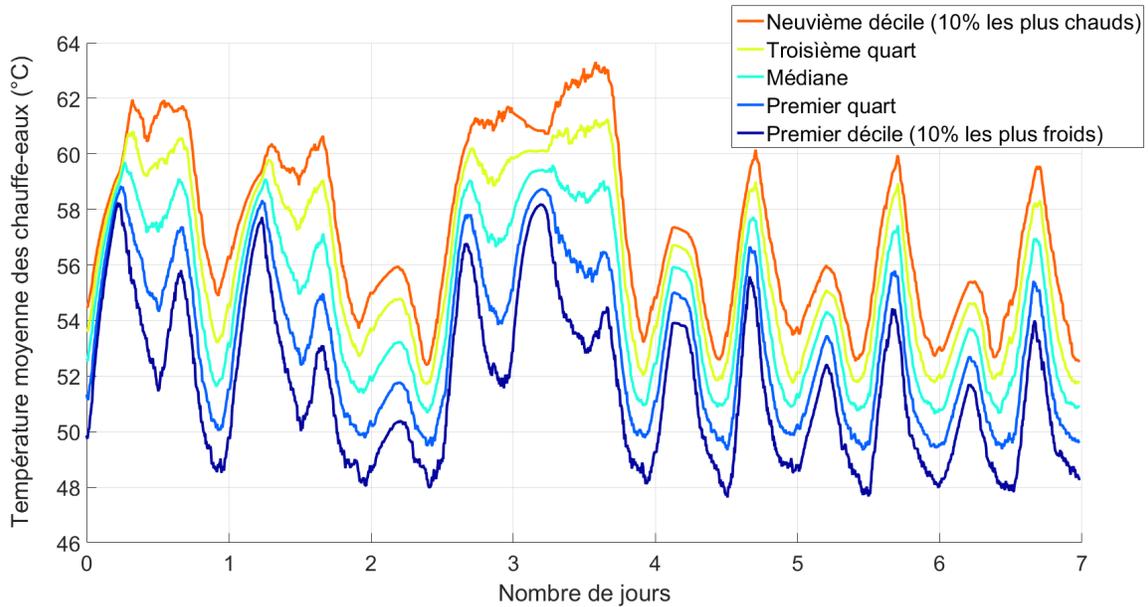


FIGURE 4.5 – Distribution de la température moyenne d'un parc de 400 chauffe-eaux avec un contrôle déterministe à champ moyen.

chauffe-eau n'a fourni d'eau chaude à une température inférieure à  $45^{\circ}\text{C}$ .

La figure 4.5 permet aussi de mettre en évidence la compétition entre deux "forces" opposées :

- la première 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 resserrer la distribution autour de la température moyenne visée.
- la deuxième force tend à augmenter la variance : elle correspond aux phases de refroidissement (décharge) du parc. Tel que vu précédemment, la baisse de la température des chauffe-eaux est régie par le tirage d'eau chaude, qui est un processus aléatoire. C'est donc de façon naturelle que ce processus aide à faire augmenter la variance de la population.

La commande à champ moyen est capable de gérer la compétition entre ces forces opposées avec l'équilibre requis pour conserver la variance désirée dans la population, et donc conserver en tout temps une marge de manoeuvre en terme de stockage d'énergie pour le réseau électrique.

Enfin, la figure 4.6 présente les trajectoires individuelles de la température moyenne de 3 chauffe-eaux choisis au hasard parmi une population de 400 chauffe-eaux avec un contrôle à champ moyen. Les premiers et derniers déciles de la figure 4.5 sont aussi tracés. Cette figure montre de façon très explicite le principe d'équité sous-jacent à la commande à champ moyen. En effet, en regardant plus spécifiquement le chauffe-eau 3 (en vert), il apparaît qu'au temps  $t = 2.7$  jours, il fait partie des chauffe-eaux les plus froids, puis au temps  $t = 4.5$  jours, il fait partie des chauffe-eaux les plus chauds. La même observation peut être faite pour les autres chauffe-eaux.

Ainsi, on remarque que malgré une moyenne et une distribution thermique qui évolue lentement, la position de chaque chauffe-eau individuellement au sein de cette distribution change très régulièrement : ce ne sont pas toujours les mêmes individus de la population qui contribuent à l'accomplissement de l'objectif collectif. Ce comportement des chauffe-eaux au sein de leur groupe est analogue à plusieurs comportements présents dans la nature, notamment à un banc de poisson ou un essaim d'étourneaux en vol (voir figure 4.7). En effet, la position de chaque étourneau au sein de l'essaim varie constamment, aléatoirement et rapidement, mais la trajectoire et la taille de l'essaim en eux-mêmes restent stables. L'essaim dans sa globalité possède une vitesse et des mouvements cohérents, comme s'il s'agissait d'une seule et même entité munie d'une volonté propre.

### Impact du contrôle à champ moyen sur le réseau de télécommunications

Tel que déjà mentionné (voir section 3.2.4), les messages liés au contrôle des chauffe-eaux et à la transmission occasionnelle de leur température moyenne (ou de leur état d'énergie) à l'ordinateur central transitent sur un réseau de télécommunications. Ce réseau de télécommunications reprend l'ensemble des caractéristiques de celui développé

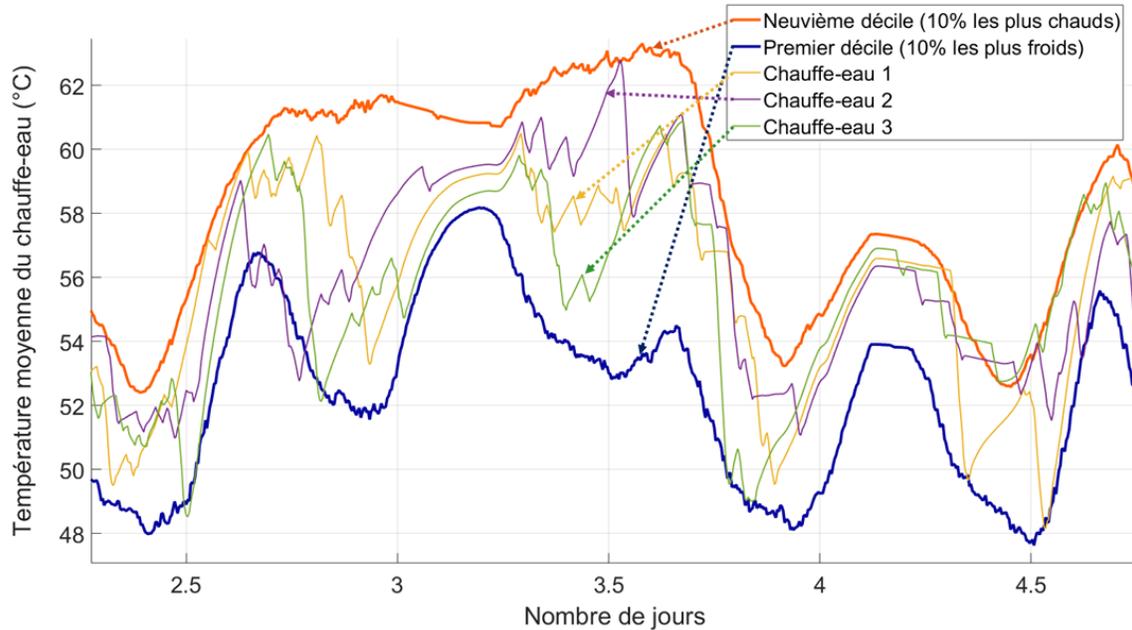


FIGURE 4.6 – Trajectoires individuelles de la température moyenne de 3 chauffe-eaux choisis au hasard parmi une population de 400 chauffe-eaux avec un contrôle à champ moyen.

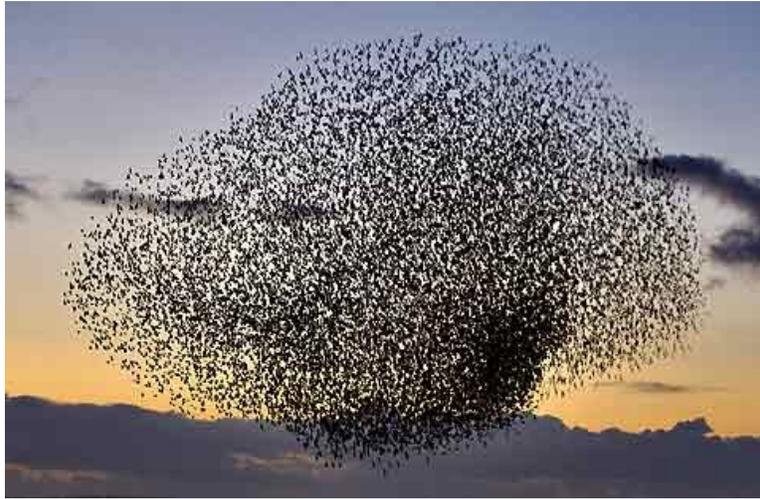


FIGURE 4.7 – Essaim d’étourneaux (*source : inconnue*)

et déployé par Hydro-Québec pour ses compteurs d’électricité intelligents : réseau de type “mesh” avec routeurs et collecteurs, 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. Celui-ci permet :

1. de rendre encore plus réaliste les simulations produites puisqu’il reproduit les délais entre l’émission et la réception des messages ;
2. de quantifier le taux d’utilisation des compteurs pour réaliser la commande à champ moyen.

En ce sens, des statistiques sont produites à la fin des simulations. Ainsi dans le cas de la simulation précédente, pour un contrôle à champ moyen avec 400 maisons avec chauffe-eaux commandés par champ moyen sur un total de 3300 maisons<sup>3</sup>, les résultats obtenus sont synthétisés au tableau 4.1.

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 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 moyennes cibles + 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, présentant 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 par des envois individuels point-à-point, qui sont alors particulièrement coûteux en termes de bande passante. Il serait possible de réduire cette durée significativement en mettant à jour le protocole de communication des compteurs (si cela est permis par les réglementations, bien sûr).

La principale conclusion que l’on peut tirer de cet exercice est que le taux d’occupation des noeuds du réseau est particulièrement faible, ce qui respecte le but visé par la commande à champ moyen, i.e. l’atteinte d’un objectif collectif via une commande très décentralisée, requérant très peu de communications entre les acteurs. Le taux d’occupation maximal observé de 22% correspond à un noeud stratégique du maillage qui pourrait être éventuellement allégé par un processus de “re-routage” des messages.

---

3. 400 compteurs sur les 3300 simulés génèrent et reçoivent des messages liés à la commande à champ moyen. Les autres compteurs participent au réseau de télécommunications en répétant les messages, mais n’envoient aucun message en lien avec le chauffe-eau de la maison qui leur est associée. Ces chauffe-eaux ne sont en fait pas contrôlés.

TABLEAU 4.1 – Sommaire des résultats associés à la performance du réseau de télécommunications pour une simulation à champ moyen de 400 maisons dans un réseau comportant 3300 compteurs au total, avec mise à jour horaire de la commande en provenance de l’ordinateur central.

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 %

### 4.3 Cas no. 2 : reprise en charge suite à un 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 transport ou production disponibles, ou encore à un bris majeur d’infrastructure, par exemple suite à une catastrophe naturelle Pourbeik et al. [2006]. Dans le cas de réseaux électriques interconnectés, les black-outs ont en plus un effet domino, et le black-out d’une région peut se propager aux régions voisines [Pourbeik et al., 2006].

Dans cette étude de cas, l’analyse se limite à observer l’allure de la reprise en charge d’une population de chauffe-eaux suite à une interruption électrique d’environ 1h20 sur la même ligne de distribution que dans l’étude de cas no. 1. Le moment où le réseau est ré-alimenté suite à la coupure électrique est particulièrement délicat, car une grande partie de la population de chauffe-eaux est en attente de chauffage, ce qui crée une pointe de consommation transitoire, le temps que la population retrouve sa diversité normale au niveau des états d’énergie. Dans cette étude, on suppose que seulement les chauffe-eaux ont une dynamique de reprise en charge synchronisée, même si dans les faits, d’autres éléments de la charge non-contrôlable (chauffage électrique, réfrigérateurs, etc.) amplifieraient la gravité de la pointe observée lors de la reprise en charge.

Dans le cas d’une population de chauffe-eaux équipée de contrôleurs thermostatiques classiques, la reprise en charge est marquée par un sévère phénomène de *payback* (courbe en vert sur la figure 4.8). Sur cette figure, on voit aussi la courbe de consommation non-contrôlable (orange), la courbe optimale fournie par l’optimisateur déterministe (en violet), ainsi que la courbe totale de consommation lorsque les chauffe-eaux sont équipés d’un contrôleur à champ moyen. Le première conclusion est que la commande à champ moyen est capable de réduire fortement le pic de reprise en charge du parc. L’explication est simple : alors que les contrôleurs thermostatiques tentent de fournir aux chauffe-eaux l’énergie perdue pendant la coupure de façon instantanée dès la re-alimentation électrique (en utilisant la puissance nominale du chauffe-eau), le contrôleur champ moyen compense cette perte sur le long terme, en préservant la diversité de consommation dans la population. 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 rapidement *rejoindre* celle-ci après environ une heure.

Il est important de mentionner qu’aucune instruction spéciale n’est envoyée au contrôleur champ moyen pendant ou après l’interruption : ceux-ci gèrent intrinsèquement la reprise en charge de façon presque idéale. En d’autres termes, le contrôleur à champ moyen est “conscient” de la perte de chauffage et donc de l’impact sur la température moyenne que cela entraîne pour l’ensemble de la population. Lorsque le réseau est remis sous tension, les contrôleurs champ moyen continuent tout simplement à fonctionner sur la dernière commande diffusée (à minuit de la même journée). Cette capacité à préserver la ligne de conduite initiale est indispensable car les interruptions électriques engendrent aussi en général une interruption du réseau de télécommunications.

Notons aussi que dans le cas d’une coupure de quelques heures, le manque en 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 imperceptible pour les usagers. Par exemple, dans la simulation de la figure 4.8, le taux de client insatisfait est nul dans les deux cas (thermostatique et champ moyen). La pointe de puissance est cependant radicalement différente (réduction majeure de la reprise en charge de 2500 W à 500 W par maison, soit 80%). L’impact au niveau des compagnies d’électricité est une remise en service plus rapide et plus sûre des secteurs affectés par une panne.

Un biais de cette étude est qu’il est considéré que les paramètres du processus aléatoire de tirage restent les mêmes pendant les périodes de coupures électrique, i.e. les habitudes de consommation d’eau chaude des consommateurs ne sont pas changées en cas de coupures d’électricité. Ce n’est certainement pas le cas en pratique, mais cela ne remet pas en cause la capacité de la commande à champ moyen à gérer en douceur une reprise en charge.

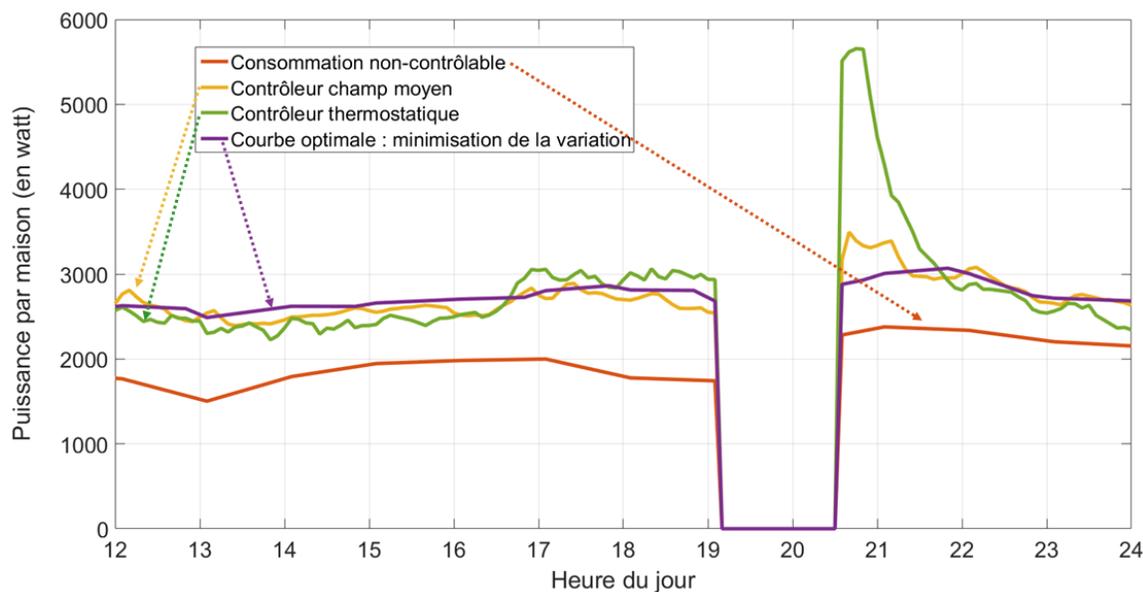


FIGURE 4.8 – Profils de la puissance moyenne consommée par maison en lien avec une coupure d’alimentation électrique entre 19h10 et 20h30 pour un parc de 400 chauffe-eaux équipés de contrôleurs i) thermostatiques (vert) et ii) champ moyen (jaune).

## 4.4 Cas no. 3 : équilibrage éolien et optimisation stochastique

### 4.4.1 Considérations générales

Cette dernière étude de cas constitue l’objectif terminal du projet smartDESC : fournir une capacité distribuée de stockage d’énergie dans le réseau électrique afin de faciliter la pénétration des énergies renouvelables, ici l’énergie éolienne. Cette production fluctuante par nature est corrélée aux prévisions météorologiques. Nous faisons donc ici intervenir l’incertitude inhérente aux prévisions météo lors de la planification du stockage : c’est le rôle de l’optimisateur stochastique décrit à la section 3.2.2.

### 4.4.2 Génération des prévisions stochastiques

L’optimisateur stochastique requiert en entrée, en plus de la température moyenne de la population (estimée par échantillonnage),  $N$  prévisions de consommation non-contrôlable et  $M$  scénarios de 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 de données publiques fournies par Environnement Canada. Ces scénarios contiennent les informations suivantes : la vitesse et direction du vent de 10 à 150 mètres de hauteur au-dessus du niveau du sol, ainsi que la température de l’air et la pression atmosphérique.<sup>4</sup>
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 courbes de puissance des éoliennes fournies 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 est capable, à partir d’une prédiction météo et d’un historique de charge pour une ligne électrique donnée, de générer une prévision de consommation non-contrôlable qui est fonction de la température, de la vitesse du vent, de l’heure et du jour de la semaine. Ainsi, les 22 scénarios météorologiques permettent d’obtenir 22 scénarios de consommation non-contrôlable.

La figure 4.9 schématise la démarche précédente. Les figures 4.10 et 4.11 montrent les différents scénarios de

<sup>4</sup> La température et la pression de l’air influent directement sur sa densité, et le rendement des éoliennes dépend de la densité du fluide qui les entraînent en rotation.

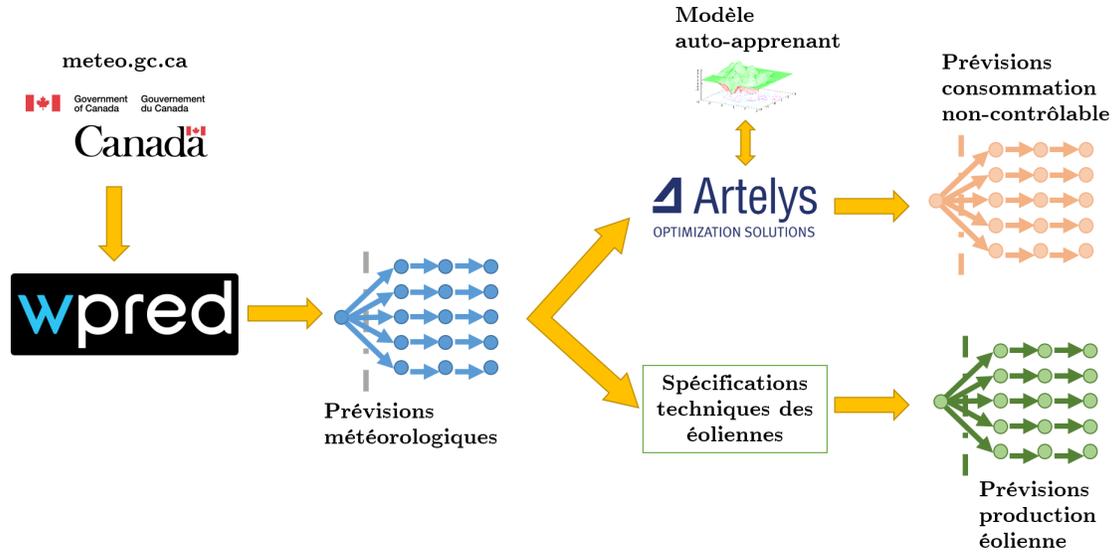


FIGURE 4.9 – Chaîne de génération des prévisions de consommation et de production éolienne.

production éolienne et de consommation non-contrôlable pour une journée d’automne. La probabilité de réalisation de chacun de ces scénarios est dans ce cas la même et vaut  $1/22 = 4.545\%$ .

Ces courbes permettent de formuler les affirmations suivantes :

- Sur la base des données d’ensemble utilisées, les écarts entre les différents scénarios de production éolienne deviennent significatifs au delà d’un horizon de 6h.
- Les scénarios éoliens présentent des évolutions très différentes et peuvent s’entrecouper.
- La prévision de la consommation électrique présente une diversité beaucoup plus faible : l’allure de la consommation est la même pour l’ensemble des scénarios.
- D’une manière générale, les scénarios de consommation électrique ne s’entrecoupent pas. Sur une période d’une dizaine d’heures, ils pourraient même être définis par un seul scénario. Une description plus fine des charges domestiques permettrait probablement d’obtenir une variabilité plus grande entre les divers scénarios, mais ceci n’a pas été étudié ici.

Ces figures montrent que la complexité et la variabilité du problème se situe principalement au niveau des prévisions de production éolienne. Les scénarios de consommation sont considérés comme essentiellement identiques (en première approximation). 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 qui suivent, il est supposé qu’un seul de ces scénarios se réalise intégralement. 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 stochastique n’est pas au courant à l’avance du scénario réel.

Les scénarios sont générés toutes les heures pour une durée de 24 heures, permettant la mise en place d’une optimisation sur un horizon glissant (*rolling horizon*). Ces scénarios sont transmis à l’ordinateur central qui se charge de générer la commande optimale résultante.

### 4.4.3 Optimisation stochastique

L’utilisation en entrée de l’ensemble des scénarios permet à l’optimisateur stochastique de générer une commande unique (24 températures moyennes cible pour les 24 heures à venir), qui prend en compte la diversité des évolutions futures. Cette commande est réactualisée toutes 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),
- Les scénarios de la production éolienne (22 scénarios de 24 heures),

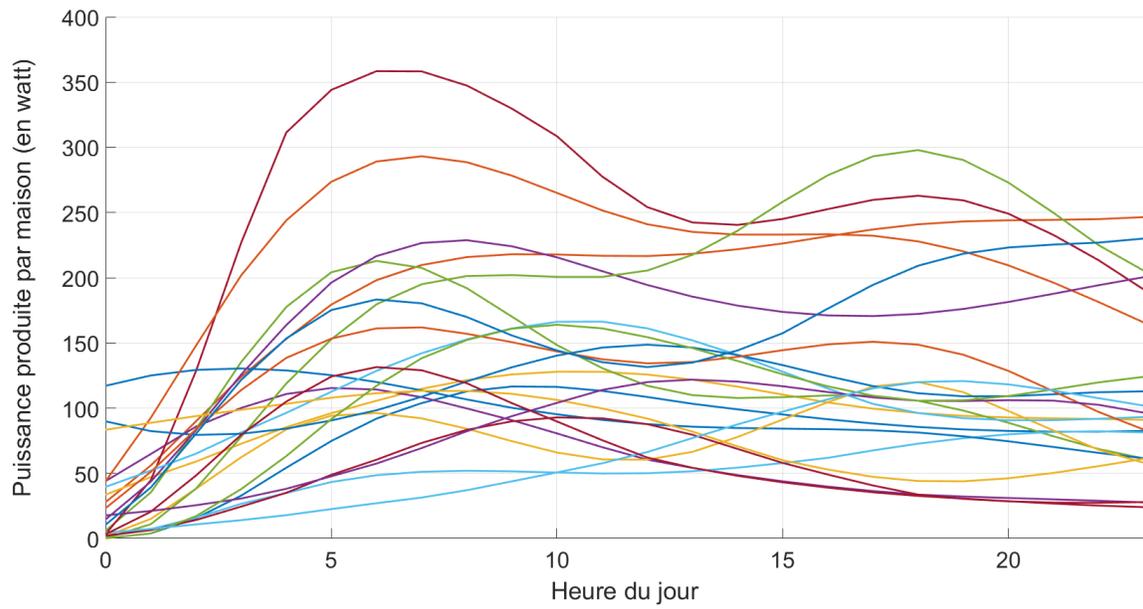


FIGURE 4.10 – Scénarios (22) de prévision de production éolienne pour la journée du 2 septembre 2016 en banlieue de Montréal.

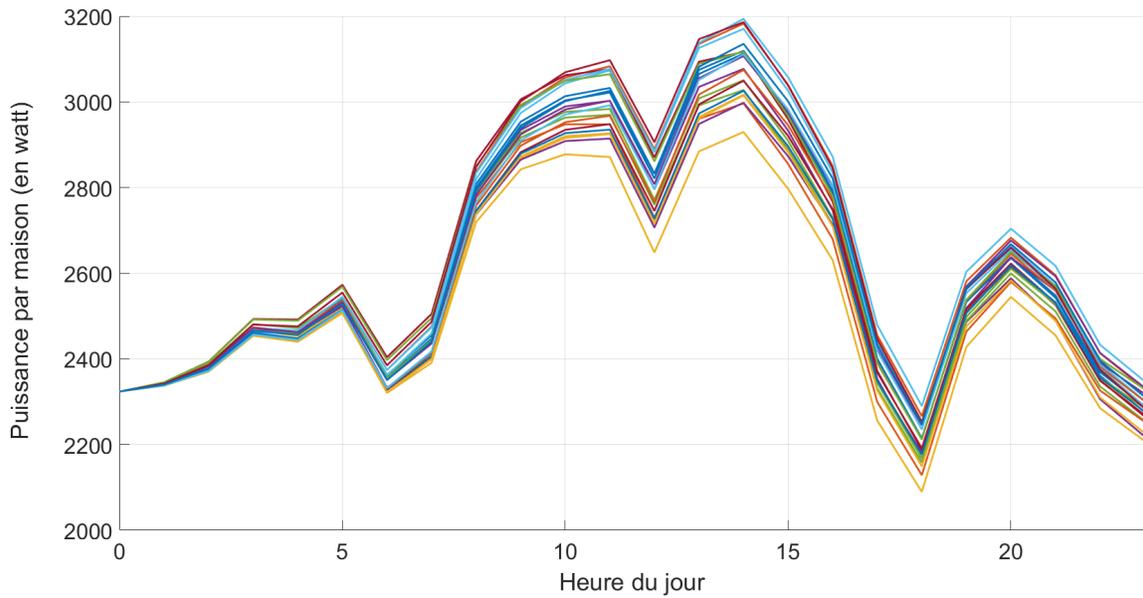


FIGURE 4.11 – Scénarios (22) de prévision de consommation pour la journée du 2 septembre 2016 en banlieue de Montréal.

- La consommation non-contrôlable réelle (un seul scénario choisi parmi les 22 scénarios possibles),
- La production éolienne réelle (un seul scénario choisi parmi les 22 scénarios possibles),
- La température moyenne du parc de chauffe-eaux (obtenue à partir des températures moyennes transmises aléatoirement par les contrôleurs locaux),
- Les paramètres des processus de tirage d'eau 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 trajectoire en température moyenne associée à ces scénarios. Cette information est rafraîchie et transmise aux contrôleurs toutes les heures.

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 constituent des données exogènes à la simulation. Ainsi, dans les résultats présentés ci-dessous, ces deux "flux" sont agrégés dans une flux unique appelé : **charge non-contrôlable**. Il faut donc bien comprendre que cette "charge non-contrôlable" correspond à la **consommation non-contrôlable des maisons moins la production éolienne**.

La figure 4.12 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 de la charge non-contrôlable sont des scénarios particuliers pris au hasard parmi les 22 scénarios générés et qui sont considérés, pour les fins de la simulation, comme : "les scénarios réels", i.e. "ceux qui se réalisent vraiment". L'optimisateur stochastique n'est pas au courant de ce choix et reçoit les 22 scénarios avec des probabilités de réalisation associées (qui sont, dans le cadre de cette étude, égales).

### Résultat de l'optimisation stochastique pour 10% de puissance éolienne installée

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

La figure 4.13 résume les résultats en 3 courbes, soit :

- la courbe de charge non-contrôlable (orange) : présentée ci-dessus, elle correspond à la consommation non-contrôlable moins la production éolienne,
- la charge totale simulée simulée (vue par le distributeur électrique) : 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 réalisée par l'optimisateur stochastique suivant la méthode de la limitation de la variation de la charge (lissage de la puissance vue par le réseau électrique). Elle inclut aussi la production éolienne.

Toutes ces courbes incluent la production éolienne dans leur tracé, c'est-à-dire que la production éolienne réelle

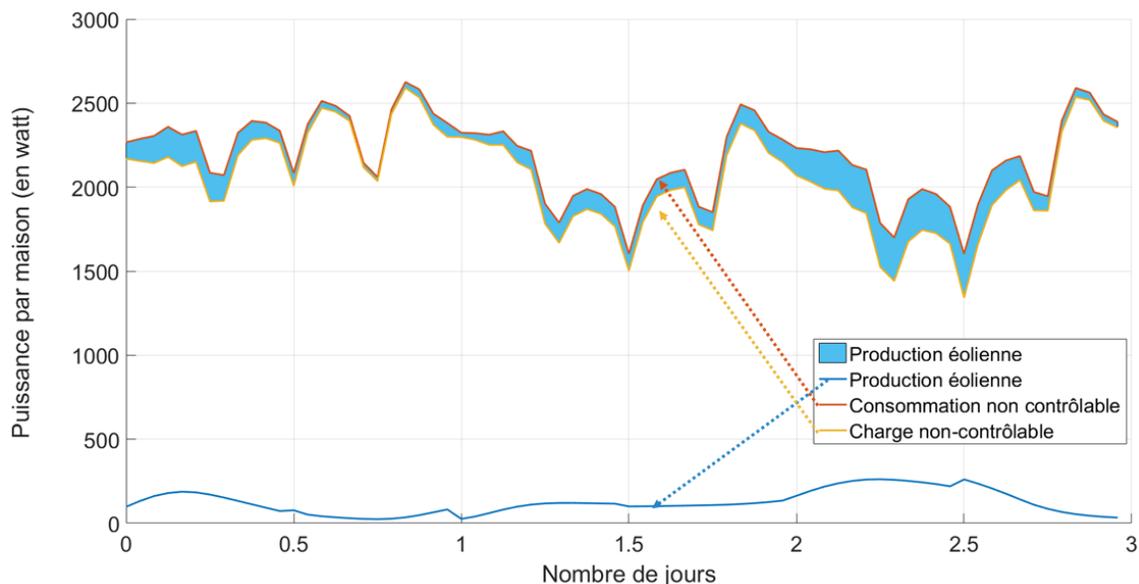


FIGURE 4.12 – Scénario de consommation non-contrôlable et de production éolienne retenus pour l'étude de cas no. 3.

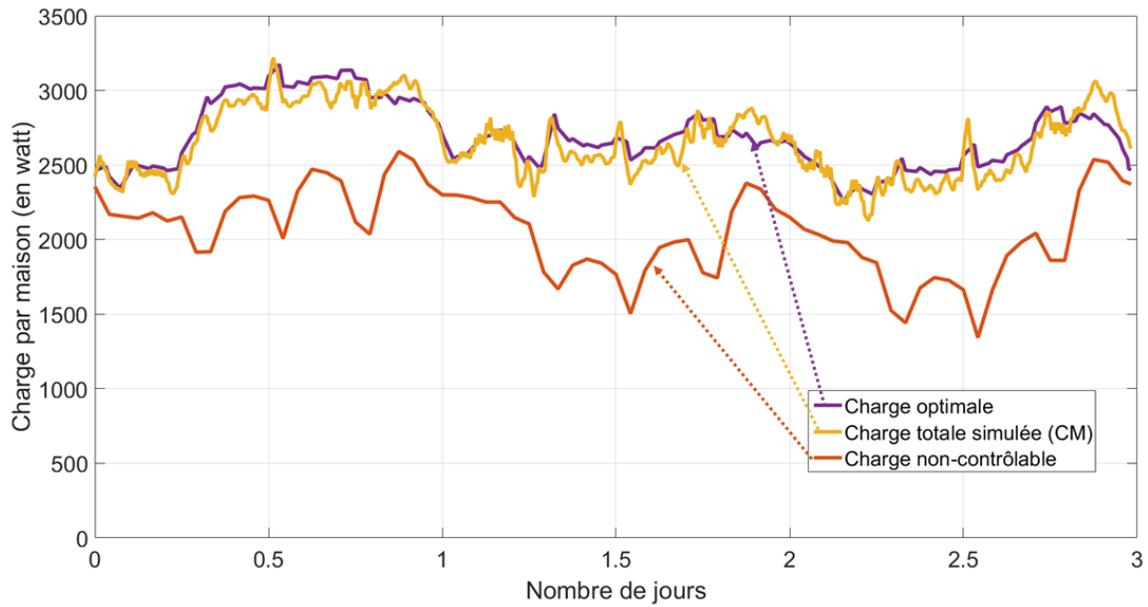


FIGURE 4.13 – Résultats d’une simulation stochastique sur 3 jours pour 600 maisons avec un taux de pénétration de 10% de puissance éolienne par rapport à la puissance en pointe du réseau.

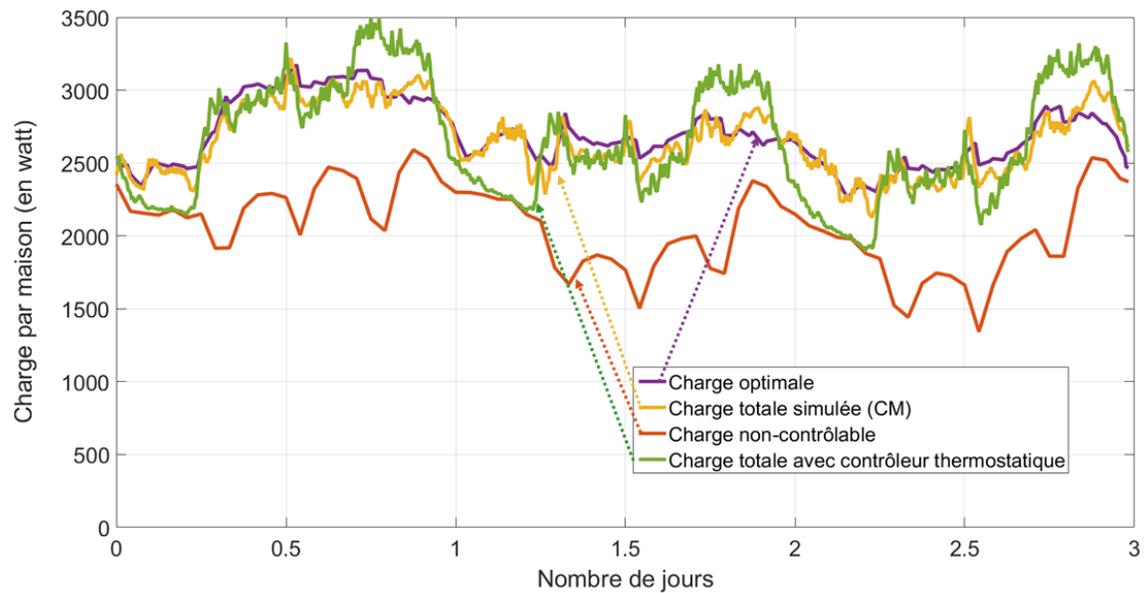


FIGURE 4.14 – Comparaison entre le contrôle champ moyen et thermostatique pour un parc de 600 maisons avec un taux de pénétration de 10% de puissance éolienne par rapport à la puissance en pointe du réseau.

(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, i.e. de réaliser de l’*équilibre éolien*. Les données de météo permettant de générer les scénarios de production et de consommation sont les mêmes : il s’agit bien d’une poste électrique ou d’une petite ville.

La figure 4.13 montre bien la capacité de la commande à champ moyen à absorber localement l’énergie éolienne produite. Ainsi, le réseau électrique est traité comme un système indépendant du parc éolien, et la consommation de puissance qu’il voit correspond à la courbe jaune de la figure 4.13. Les variations et le caractère imprévisible de l’éolien sont donc gérés localement et sont ainsi quasi-invisibles pour le reste du réseau. En particulier 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 consommation électrique totale des maisons.

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 figure 4.14 montre à la fois la charge totale thermostatique (en **vert**) et la charge totale champ moyen (en **jaune**). Il ressort que le contrôle en champ moyen permet de mieux lisser la charge totale (incluant la production éolienne) que le contrôle thermostatique, tel que déjà démontré. 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 trajectoire optimale (en **violet**) à cause des écarts possibles entre les consignes et les réalisations de celles-ci, les résultats restent très bon par rapport au contrôle thermostatique classique.

### Résultat de l’optimisation stochastique pour 20% de puissance éolienne installée

À titre de cas final, afin de pousser davantage les limites du contrôle à champ moyen, le parc de production éolienne a été doublé pour atteindre 20% de la puissance en pointe du réseau électrique. Ainsi, on observe sur la figure 4.15 un pic de 500 W (par maison) de production éolienne durant la 3<sup>ème</sup> journée. Si l’on compare avec la charge non-contrôlable maximale ( $\approx 2500$  W), on retrouve un ratio de 20%.

La figure 4.16 présente les résultats de l’optimisation stochastique. On y retrouve :

- En **orange**, la charge non-contrôlable, qui correspond à la consommation non-contrôlable des foyers moins la production éolienne.
- En **violet**, la consommation résultant de l’optimisation stochastique. Cette courbe correspond aussi à la charge totale si les chauffe-eaux suivent exactement la trajectoire de température moyenne déterminée par l’optimisateur stochastique.
- En **jaune**, la charge totale simulée pour un parc de chauffe-eaux équipés de contrôleurs champ moyen. On retrouve toujours des écarts avec la charge optimale dus à “l’écrasement” de la distribution thermique des chauffe-eaux sur les bornes de température (50°C et 60°C).
- En **vert**, la charge totale pour un parc de chauffe-eaux équipés de contrôleurs thermostatiques, donc sans optimisation de la consommation.

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 les courbes de charge totale, vue par le réseau électrique.

Encore une fois, on voit bien la capacité du contrôle à champ moyen à absorber des fluctuations éoliennes, malgré la proportion élevée dans le cas présent (20% de la puissance en pointe du réseau). En effet, la courbe **jaune** présente des variations assez faibles par rapport à la courbe optimale, alors que la courbe thermostatique **verte** présente des pics de puissance importants. 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 ne présente que faibles variations en fonction du temps.

## 4.5 Essais sur la plateforme physique

En toute dernière étape du projet, des essais sur la plateforme physique décrite à la section 3.3 ont été réalisés afin de i) vérifier la qualité du modèle thermique utilisé dans le simulateur, et ii) montrer qu’il était possible de réaliser une implémentation concrète du contrôleur local requis par la commande à champ moyen, et ce, avec des équipements commerciaux existants. Dans un premier temps, pour tester le modèle thermique, des cycles de chauffage et refroidissement simples ont été appliqués au chauffe-eau. Après quelques itérations, toutes les constantes du modèle ont pu être calibrées. Ensuite, le mode thermostatique a été testé avec succès et, finalement, le contrôleur local a été testé pendant un mois, tel que décrit ci-dessous.

La méthodologie utilisée pour tester le contrôleur local en lien avec une commande à champ moyen générée par simulation fut la suivante : une simulation à champ moyen a été réalisée au préalable sur une grande population de chauffe-eaux avec le simulateur global, et l’état de l’ensemble des chauffe-eaux simulés a été sauvegardé en fonction du temps (profil de température, tirage d’eau, état de chauffage). Ensuite, la température du chauffe-eau physique a été initialisée dans le même état qu’un premier chauffe-eau simulé (l’état initial était toujours pris au courant de la nuit, de façon à ce que la température soit uniforme dans l’ensemble du volume du chauffe-eau, résultat du faible tirage d’eau pendant cette période). Puis, pendant 24 heures, les mêmes conditions de tirage d’eau que dans le cas simulé ont été appliquées sur la plateforme. De cette façon, il est possible d’émuler autant de journées simulées que de chauffe-eaux présents dans la simulation, chacun ayant un historique de tirage d’eau différent. Évidemment, cette opération prend un temps énorme (24 heures de temps réel par chauffe-eau, plus environ heure par initialisation), donc il n’est pas possible d’émuler physiquement des centaines de scénarios à moins de laisser la plateforme tourner pendant plusieurs mois.

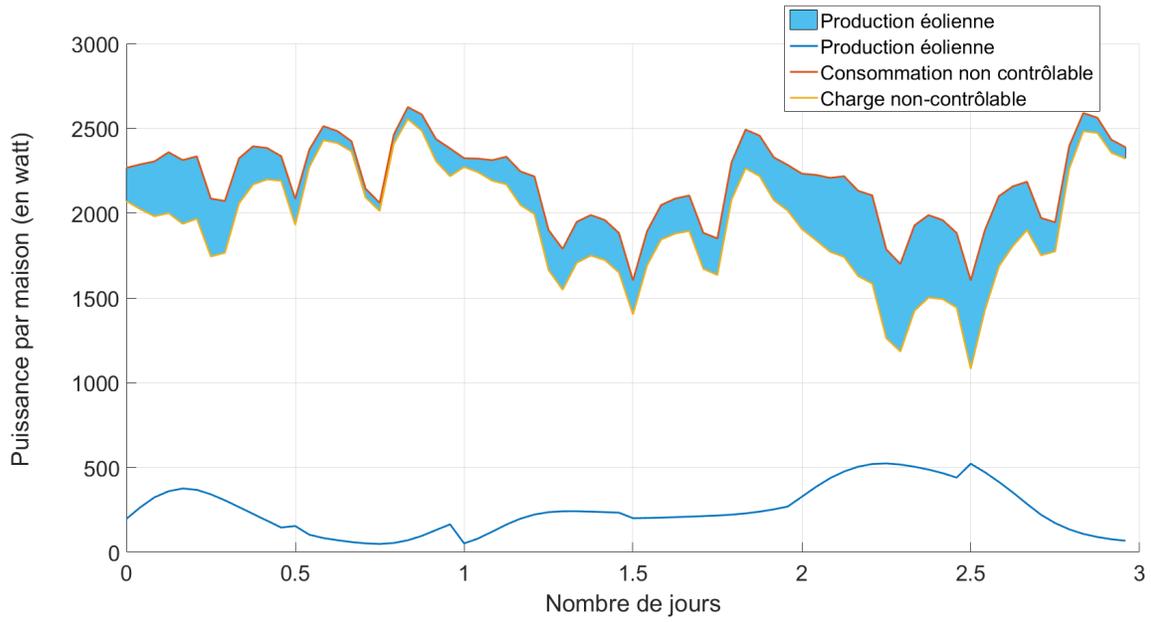


FIGURE 4.15 – Scénario de consommation non-contrôlable et de production éolienne retenus pour une étude de cas avec 20% de puissance éolienne installée par rapport à la puissance en pointe du réseau électrique.

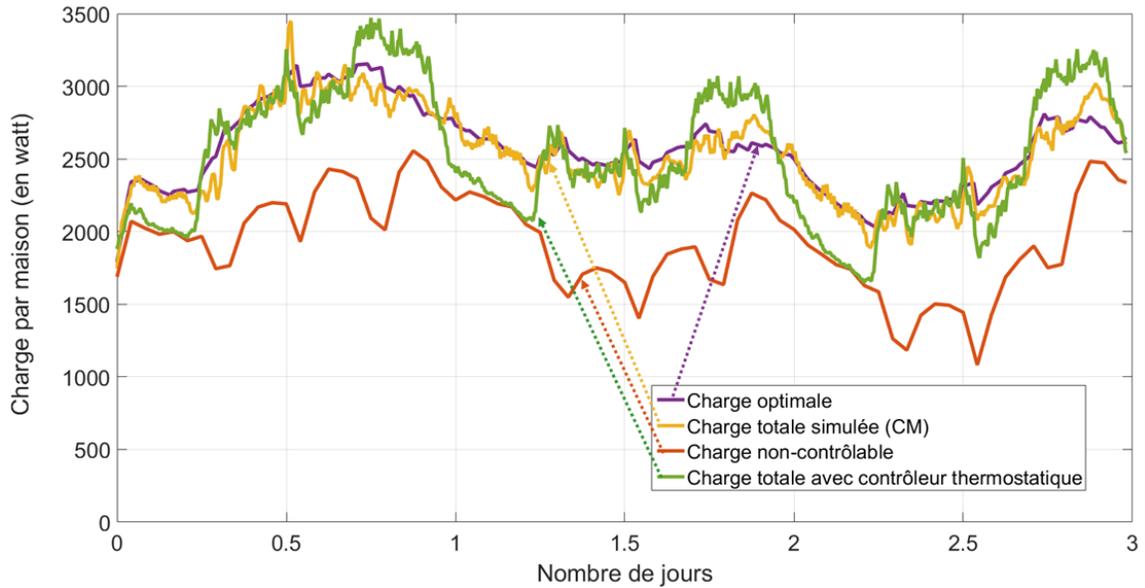


FIGURE 4.16 – Comparaison entre le contrôle champ moyen et thermostatique pour un parc de 600 maisons avec production éolienne atteignant 20% de la puissance en pointe du réseau électrique.

Dans le cas présent, au moment de produire ce rapport, 30 chauffe-eaux-jours avaient pu être émulés sur la plateforme. Bien que tout semble indiquer que l'implémentation physique du contrôleur local fonctionne bien, il faudrait obtenir un plus grand nombre de résultats pour conclure que la moyenne de température du groupe colle bien à la trajectoire dictée par l'ordinateur central, tel que le veut la loi des grands nombres sur laquelle repose toute la commande à champ moyen. Les résultats n'ayant pas été analysés en détails à ce jour, ce rapport ne présente aucune figure en lien avec les résultats obtenus sur la plateforme. Cependant, une chose est sûre : le contrôleur champ moyen n'est pas encore optimisé pour un déploiement industriel, et le travail pour y parvenir devra faire partie d'une phase d'industrialisation ultérieure.

Enfin, il paraît important d'insister sur le fait que la plateforme actuelle ne permet pas de tester réellement toute l'infrastructure matérielle requise pour réaliser une commande à champ moyen sur une grande population de chauffe-eaux. En effet, même si l'architecture actuelle du simulateur permet de reproduire de façon assez réaliste tout l'aspect d'agrégation des données, dans la pratique, ce sont des milliers de capteurs qui retourneraient des informations via les contrôleurs locaux et un réseau de télécommunications à définir. L'effet des pannes de transmission ou de tout autre équipement dans un tel réseau demeure à quantifier, mais c'est surtout l'effet de la variabilité réelle des différentes statistiques de tirage d'eau dans une implantation réseau, par rapport à celle estimée aux fins de calcul de champ moyen, qui demeure une source de préoccupation éventuelle. En effet, la loi des grands nombres fonctionne (tel que clairement démontré en simulation), et l'implémentation matérielle a été démontrée via la plateforme, mais encore faut-il posséder les bons paramètres statistiques pour mener à bien les calculs. La question d'apprentissage progressif en ligne des modèles statistiques de tirage d'eau, ainsi que la partition des consommateurs en classes homogènes dans un objectif de commande bien ciblée, devraient donc devenir des sujets de recherche importants dans le futur.

# Chapitre 5

## Conclusion

### 5.1 Avantages et résultats du projet

Le projet smartDESC (RENE-034), mené dans le cadre des initiatives éco-énergétiques du gouvernement fédéral du Canada (EcoEII), a permis de démontrer l'efficacité de la théorie de la commande à champ moyen pour gérer un grand nombre d'éléments de stockage distribués dans un réseau électrique, afin de réaliser du lissage de la consommation électrique en fonction du temps, ou plus important encore en regard des objectifs du programme, de l'équilibrage éolien dans un réseau électrique. Dans ce second cas, cela permet d'envisager une augmentation de la pénétration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques canadiens. Il a été montré dans ce rapport qu'une pénétration éolienne de 20% pouvait être entièrement absorbée par une gestion adéquate du stockage d'énergie thermique dans des chauffe-eaux domestiques équipés de contrôleurs à champ moyen. Ce pourcentage s'ajoute à toute autre proportion de puissance éolienne déjà installée dans le réseau, ce qui repousse potentiellement la limite du taux de pénétration au-delà des seuils conventionnels, et ce, sans nécessiter de garantir cette puissance éolienne additionnelle par des centrales de production supplémentaires.

Il a aussi été démontré dans ce projet que la commande à champ moyen permet de résoudre le problème de pointe due à la reprise en charge sur les réseaux électriques, i.e. une pointe de puissance qui apparaît suite à la ré-alimentation électrique d'un réseau qui a subi une interruption électrique. De plus, la commande à champ moyen requiert une très faible bande passante en termes de télécommunications. Par conséquent, une commande à champ moyen déployée dans un réseau électrique pourrait se contenter d'une communication via un réseau de compteurs intelligents à très faible débit, et n'occuperait que moins de 1% de la bande passante de ces derniers.

Une retombée intéressante de ce projet a été le développement d'un simulateur multi-agents qui permet de coupler un ensemble de processus disparates dans une simulation temporelle synchronisée. La structure logicielle de ce simulateur (basé sur l'environnement JADE) est disponible sur demande, mais aucune garantie ni soutien technique ne peut être offerte pour son exploitation puisque l'équipe de projet est maintenant dissoute.

Enfin, une plateforme physique comportant un chauffe-eau réel commandé par un contrôleur à champ moyen a été réalisée. La plateforme a permis de vérifier que le modèle thermique du chauffe-eau utilisé dans le simulateur était fiable. De plus, il a été possible de vérifier que le contrôleur local requis pour la commande à champ moyen était réalisable physiquement, sans avoir besoin de recourir à des composantes sophistiquées : un simple micro-contrôleur, quelques équipements de télécommunications ethernet ou wifi et une instrumentation de base suffisent.

### 5.2 Prochaines étapes de R&D dans le domaine

De façon générale, la preuve de concept de la commande à champ moyen a été faite par simulation de façon concluante. Une plateforme physique a aussi été réalisée en fin de projet pour valider expérimentalement que le contrôleur local requis par la commande à champ moyen peut être réalisé avec des moyens techniques disponibles sur le marché, et que ce dernier se comporte tel que la simulation le suggère.

À ce stade-ci, le concept pourrait être implémenté quasiment tel quel dans un projet de démonstration, à condition de trouver :

1. un manufacturier qui prendrait en charge la fabrication des contrôleurs en champ moyen ;
2. un distributeur électrique qui serait prêt à installer dans son réseau les équipements nécessaires, tant au niveau centralisé que local (chez les clients) ;

3. selon le contexte, un fournisseur de service d'agrégation pour la gestion des données entre le client et l'ordinateur central ;
4. un promoteur qui prendrait en charge la gestion et la coordination du projet.

Il va de soit que l'implémentation physique devrait être revue en toute première phase d'un nouveau projet afin d'être amené à un stade plus près d'un produit commercial.

La présence du promoteur initial (Polytechnique Montréal) serait encore nécessaire pour le transfert de la technologie dans la phase de développement préalable à la phase de démonstration. De plus, un certain nombre d'éléments de recherche demeurent en suspens et permettraient d'améliorer davantage les performances de la commande à champ moyen, notamment appliqué aux chauffe-eaux. À titre d'exemple, mentionnons :

1. le développement d'un algorithme d'apprentissage pour identifier les processus stochastiques de tirage d'eau chaude propre à chaque client (pour améliorer les performances du contrôleur local) ;
2. l'amélioration de la gestion des contraintes de confort en lien avec le suivi de la trajectoire de température moyenne des chauffe-eaux (effets de "bords") ;
3. la généralisation de la commande à champ moyen à d'autres types de charges et éléments de stockage d'énergie, notamment le conditionnement (chauffage ou refroidissement des espaces [Moffet et al., 2012]), les véhicules électriques [Tuffner and Kintner-Meyer, 2011], etc. ;
4. la généralisation des algorithmes d'optimisation pour prendre en considération différentes classes de charges contrôlées ;
5. etc.

Les améliorations qui seraient faites en recherche en parallèle à un éventuel projet de démonstration pourraient être intégrées dans la démonstration sous la forme de mise à jour du *firmware* des contrôleurs locaux, et aussi au niveau de l'amélioration en continu des algorithmes d'optimisation dans l'ordinateur central.

# Bibliographie

- Larry Hughes. Meeting residential space heating demand with wind-generated electricity. *Renewable Energy*, 35(8) : 1765–1772, 2010.
- Coopérative régionale d’électricité de St-Jean-Baptiste-de-Rouville, 2016. URL : <http://www.coopsjb.com/>. [Online ; accessed March 8<sup>th</sup> 2016].
- Jean-Michel Lasry and Pierre-Louis Lions. Mean field games. *Japanese Journal of Mathematics*, 2(1) : 229–260, 2007.
- Jérôme Solis. Développement d’un estimateur d’état énergétique d’un chauffe-eau pour un contrôle par champ moyen. *Master’s thesis*, Polytechnique Montréal, 2015.
- Minyi Huang, Roland P Malhamé, and Peter E Caines. Large population stochastic dynamic games : closed-loop Mckean-Vlasov systems and the Nash certainty equivalence principle. *Communications in Information & Systems*, 6(3) : 221–252, 2006.
- Pouyan Pourbeik, Prabha S Kundur, and Carson W Taylor. The anatomy of a power grid blackout. *IEEE Power and Energy Magazine*, 4(5) : 22–29, 2006.
- Marc-André Moffet, Frédéric Sirois, and David Beauvais. Case studies : Balancing wind generation using electric thermal storage and electric water heaters. *CanmetENERGY*, Report no. 2012 067 RP CAS 411 SGZONE : 32 p., 2012.
- Frank K Tuffner and Michael CW Kintner-Meyer. Using electric vehicles to meet balancing requirements associated with wind power. *Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)*, Report no. PNNL-20501 : 48 p., 2011.
- Roland Malhamé and Chee-Yee Chong. Electric load model synthesis by diffusion approximation of a high-order hybrid-state stochastic system. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 30(9) : 854–860, 1985.
- Arman C. Kizilkale, Frédéric Sirois *et al.* Tammam, M. Anjos, M. Bernier, M. Gendreau, B. Sanso, and R. P. Malhamé. smartDESC : smart distributed energy storage controller. *to be submitted to IEEE Power and Energy Magazine*, 2017. URL to preliminary version : <http://www.cim.mcgill.ca/%7Earman/preprints/2016PEM.pdf>.
- Arman C. Kizilkale and Roland P. Malhamé. *Collective target tracking mean field control for Markovian jump-driven models of electric water heating loads*, chapter 20 in : *Control of Complex Systems : Theory and Applications*, edited by K. G. Vamvoudakis and S. Jagannathan, Butterworth-Heinemann (Elsevier), p. 559–584, 2016.