

HEC MONTRÉAL

**Gérer les usages énergétiques dans
les maisons unifamiliales
Optimisation de la demande de pointe**

par

Julien Robert

Sciences de la gestion

Analytiques d'affaires

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de maîtrise ès science en gestion
(M. Sc.)*

Décembre 2017

© Julien Robert, 2017

Résumé

La recherche vise à minimiser la pointe de puissance soutirée par une maison unifamiliale en contrôlant de façon coordonnée les appareils ménagers et le chauffage. Un algorithme de contrôle est proposé pour évaluer les résultats atteignables et différents formats de prix pouvant inciter les comportements désirés des consommateurs sont présentés. Les résultats atteignables et la pertinence des formats de prix sont testés sur des données simulées de besoins en appareils ménagers et pour les températures de 2016 à Montréal. L'évaluation des résultats atteignables montre une baisse du pic de puissance soutirée de près de 30%. L'étude des formats de prix montre qu'un format de prix dual facturant consommation et puissance maximale soutirée est approprié pour inciter le comportement souhaité. Finalement, une étude de sensibilité montre que soit le contrôle du chauffage soit celui des appareils ménagers sans contrôle de l'autre permet l'atteinte de résultats significatifs.

Abstract

This paper aims to minimize the peak demand of electricity or the capacity necessary for a detached house by controlling and coordinating appliances and heating. A control algorithm is presented to evaluate the potential benefits and three price schemes that could incentivise the desired consumer behaviors are evaluated. The potential diminutions in pic demand and the appropriateness of the price schemes are tested on simulated data for consumer needs in appliances and temperatures of 2016 in Montreal. The results evaluation suggests a reachable decrease in pic demand of almost 30%. The study of the price schemes shows that a price on both capacity and consumption incentivizes the desired behavior for consumers. Finally, a sensitivity analysis shows that the control of either appliances or heating is enough to obtain significant results.

Remerciements

Je tiens à remercier Pierre-Olivier Pineau, professeur à HEC Montréal directeur de cette recherche, pour son très précieux soutien dans la réflexion sur le sujet et la réalisation de ce mémoire. J'aimerais également remercier François Tardy qui a apporté sa connaissance du sujet et a participé à la relecture de ce mémoire. Finalement je tiens à remercier Gilbert Laporte et Michel Denault qui ont accepté de participer à la correction de ce mémoire.

Table des matières

1. Introduction	1
2. Compréhension du lien capacité et consommation.....	4
3. Revue littérature	6
3.1 Le concept de smart-grid.....	6
3.1.1 Exemples d'applications du smart grid	6
3.1.2 Les composantes du smart grid	7
3.2 Les applications de gestion de la consommation.....	8
3.2.1 Les programmes de gestion de la demande	8
3.2.2 La gestion active de la demande.....	9
3.2.2.1 Les différents objectifs potentiels	11
3.2.2.2 Les différents appareils considérés	12
3.2.2.3 Les différentes méthodes d'optimisation	13
3.2.2.4 Les différences temporelles.....	13
3.3 Modélisation des paramètres	14
4. Méthodologie	17
4.1 Méthodologie générale	17
4.2 Données sélectionnées	18
4.2.1 Données de simulation	18
4.2.1.1 Besoins en déclenchements d'électroménagers et capacités utilisés des appareils	18
4.2.1.2 Températures extérieures pour besoins en chauffage.....	20
4.2.3 Constantes du modèle.....	21
4.2.3.1 Constantes de prix.....	21
4.2.3.2 Constante de chauffage	23
4.3 Le modèle d'optimisation.....	26
4.3.1 Paramètres et notations utilisés	26
4.3.2 Variables du modèle	27
4.3.3 Différentes fonctions objectifs.....	28
4.3.4 Contraintes du modèle	29
4.3.4.1 Contraintes des utilisateurs	29
4.3.4.2 Contraintes permettant la création de variables artificielles et intermédiaires	31

5 Analyse des résultats	33
5.1 Choix des données tests	33
5.2 Profils de consommation induits selon les formats de prix	36
5.2.1 Comparaison des formats de prix.....	36
5.2.2 Évaluation sur les données tests.....	40
5.2.2.1 Journée A	40
5.2.2.2 Journée B	42
5.2.3 Considération de la pire journée sans sècheuse	45
5.3 Étude de sensibilité sur divers paramètres	46
5.3.1 Impact de la flexibilité sur le déplacement temporel de l'allumage des appareils..	46
5.3.2 Impact de l'étendue possible des variations de températures	48
5.3.3 Impact de l'augmentation des capacités de chauffage	49
5.3.4 Impact de la variation du bi-tarif sur un comportement optimisé.....	49
6. Améliorations et études complémentaires possibles	51
6.1 Représentativité du modèle.....	51
6.1.1 Gestion de la température	51
6.1.2 Caractéristiques des maisons	52
6.2 Ajouts d'appareils pertinents	52
7. Conclusion	53
8. Bibliographie.....	55
9. Annexes.....	58
9.1 Code OPL.....	58

1. Introduction

L'industrie de l'énergie est actuellement en évolution très rapide. De nouvelles technologies émergent, tant dans la production que dans la consommation. Les opinions publiques évoluent et une partie du public est de plus en plus sensibilisée. En particulier sur l'électricité, le nombre d'appareils et le nombre d'utilisateurs ne cessent d'augmenter, cependant cette augmentation est compensée en grande partie par les progrès en efficacité énergétique. Cette tendance observable depuis plusieurs années est remise en question par la diffusion des voitures électriques qui pourraient créer une nouvelle source importante de consommation électrique – notamment dans les besoins en puissance. Ce climat particulier crée de grandes opportunités pour des améliorations technologiques, de comportement ou autres. Cependant, une mauvaise gestion de ces tendances pourrait entraîner une hausse importante des dépenses ou une incapacité à satisfaire les besoins de tous.

Dans le contexte particulier québécois, la quasi-totalité des dépenses nécessaires pour remplir les besoins de tous en électricité sont des coûts fixes liés aux investissements en infrastructures pour produire, transporter et distribuer l'électricité. En effet, le coût de production tend vers zéro grâce à l'abondance d'énergie renouvelable. Cependant les coûts d'investissement en transport, particulièrement vers les zones urbaines à forte demande, et en distribution gagnent en importance. Ceci est dû aux importantes distances et au manque de terrain dans les zones urbaines. Les investissements dans ces infrastructures ne sont pas décidés par le gouvernement mais sont des conséquences directes de l'évolution de la demande car le réseau doit être capable de répondre à la demande maximale des utilisateurs, la demande dite « de pointe » (ou pic de demande). Les termes demande de pointe ou pic de demande seront utilisés indifféremment dans cette étude. Le réseau est donc construit pour pouvoir répondre à la demande en électricité la journée la plus froide de l'hiver avec les industries en production et une demande importante des ménages. Les investissements sont donc une conséquence directe de la capacité requise du réseau et de son évolution prévue. Toute économie de capacité requise se traduirait en économie en investissements.

Bien que sensibilisés à l'importance de ne pas surconsommer de l'énergie, les utilisateurs ne sont pas informés de l'importance de la capacité nécessaire pour leur ménage sur les investissements publics. La tendance est à l'achat de véhicules

électriques pour limiter la pollution et économiser, mais cette tendance ne considère pas l'augmentation induite de la capacité nécessaire pour la recharge électrique.

Cette augmentation des besoins, l'importance relative de la capacité sur les investissements et cette non-sensibilisation des utilisateurs entraînent de grands défis. Comment contrôler l'augmentation de la capacité nécessaire sur le réseau afin de limiter les investissements en infrastructure ? Deux avenues peuvent être explorées, la gestion de la consommation et la gestion de la production. Cette recherche s'intéresse en particulier à l'aspect consommation et s'interroge sur les modifications des habitudes des utilisateurs pour contrôler la hausse de capacité. Ces changements peuvent être forcés par un contrôle externe mais il est alors important de respecter les besoins des utilisateurs et de ne modifier que marginalement leurs demandes. Cette modification peut aussi être créée de façon volontaire par la mise en place d'incitatifs, principalement financiers.

Dans un rapport nommé « Coûts évités » publié en juillet 2017, Hydro-Québec évalue que pour chaque kilowatt (kW) de puissance nécessaire évité, Hydro-Québec, et donc la société, économise 20 \$ par hiver. Cette évaluation est valable pour 5 ans, le coût en investissement évité passe ensuite à 110 \$ par kW par hiver à partir de 2023. Par exemple, une économie de simplement 10 000 kW (soit 10 MW) à l'échelle de la province en termes de capacité pour l'année 2018 entraînerait une économie en investissement nécessaire de 200 000\$ par an soit 1 000 000\$ d'ici 2023 et 7 700 000\$ entre 2023 et 2030, soit un total de 8 700 000\$ d'ici 2030. Ces économies sont atteignables en économisant un kW par maison en demande de pointe, pour 10 000 maisons. Les économies potentielles sont donc significatives à l'échelle de la province.

Les publications récentes de Hydro-Québec montrent un réel besoin de stratégies permettant de réduire le pic de capacité. Par exemple dans le rapport sur le développement durable (<http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/centre-documentation/rapport-developpement-durable.htm>), Hydro-Québec propose une stratégie de gestion de la demande. Leur stratégie s'applique pour des bâtiments commerciaux et de bureaux et propose de surchauffer de 2°C avant la pointe, arrêter le chauffage et autoriser une chute de 2°C de la température pendant le pic avant de rétablir progressivement l'état initial. Ces publications montrent l'importance de cette recherche pour l'industrie et la pertinence de développer des stratégies minimisant le pic de puissance soutirée.

Ce contexte pose l'importance de ce travail et amène à sa question de recherche. Comment minimiser le pic de consommation électrique dans les maisons unifamiliales et quels résultats sont atteignables ? Pour répondre à cette question, un algorithme de contrôle externe respectant les besoins du ménage modélisé est présenté et des schémas de prix alternatifs et incitatifs sont examinés. Dans un premier temps, ce travail détaille divers articles de la littérature pour présenter ce thème, les données disponibles pour ces travaux et les travaux équivalents déjà publiés. Dans un deuxième temps, les données choisies sont présentées et le modèle d'optimisation créé est détaillé. Finalement les résultats permettant d'évaluer la qualité des économies réalisables sont analysés afin d'évaluer si cette avenue est adaptée pour répondre à l'évolution des besoins en capacité et pour évaluer si des incitatifs financiers peuvent créer les comportements recherchés.

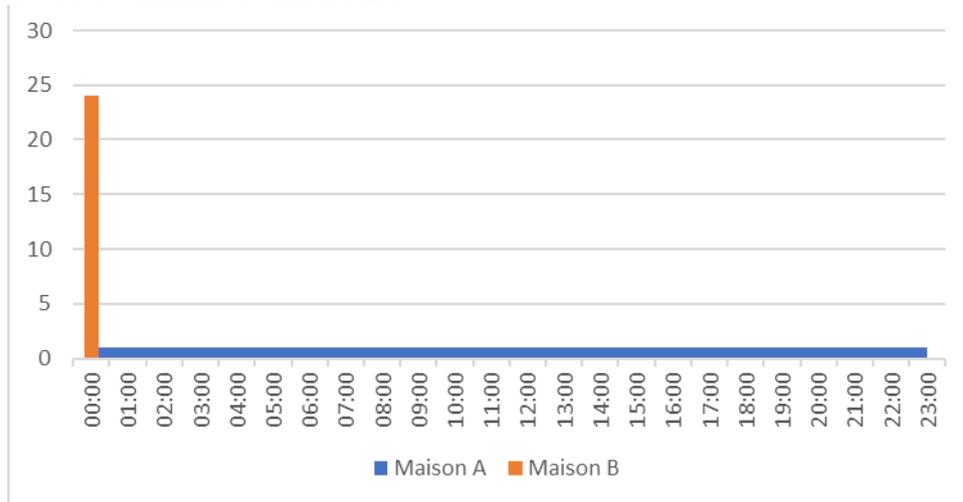
2. Compréhension du lien capacité et consommation

La bonne compréhension de cette recherche et de la méthodologie choisie suppose une bonne compréhension de la différence entre capacité et consommation et du lien entre ces deux concepts. La capacité représente le potentiel d'utilisation de l'énergie par un appareil, soit en langage moins technique la quantité maximale d'énergie pouvant être utilisée en un instant. Elle se mesure en watt (W). Par opposition, la consommation représente la quantité d'énergie effectivement consommée par un appareil dans un intervalle de temps donné. Elle se mesure en joules (J) dans le système international ou en wattheure (Wh). Un Wh vaut 3600 joules. Le système international lie capacité et consommation avec les watts (W) se mesurant en joules par seconde (J/s). Cette étude utilisera les Wh afin de faciliter le lien avec les unités utilisées dans les formats de prix. L'intervalle de temps considéré par défaut est une heure. Le lien entre capacité et consommation est calculé pour cette période. Ainsi, un appareil de capacité 1 W consommera 1 Wh s'il fonctionne à pleine capacité pendant une heure. Le même appareil consommera 0.5 Wh s'il fonctionne à pleine capacité pendant 30 minutes ou à mi-capacité pendant une heure. À l'inverse, une consommation de 1 Wh dans une période de 30 minutes supposera un appel de puissance de 2 W.

Bien que liés, ces deux concepts ne sont pas forcément corrélés. Ainsi, une haute consommation totale ne suppose pas forcément une haute puissance soutirée si la consommation est constante. Inversement, une relativement basse consommation totale ne suppose pas une basse puissance soutirée si la consommation a lieu dans un très court laps de temps. Par exemple, ce n'est pas parce que deux maisons consomment 24 kWh dans une journée que la puissance soutirée ou la capacité nécessaire est identique. Si la maison consomme 1 kWh pendant chaque heure durant la journée, la consommation totale sera de 24 kWh et la puissance soutirée sera de 1 kW. De la même façon, si la maison B consomme 24 kWh en une heure puis rien pendant le reste de la journée, la consommation totale sera toujours 24 kWh mais la puissance soutirée sera cette fois 24 kW, soit une capacité 24 fois plus grande.

Ce point est observable sur la figure 1. La consommation est représentée par l'aire sous les courbes et est égale pour les deux maisons. La puissance soutirée est représentée par l'ordonnée maximum des courbes.

Figure 1. Consommation et puissance soutirée pour deux maisons avec profils de consommation différents



Mathématiquement, la conversion peut être effectuée par :

$$\text{Consommation (Wh)} = \text{Capacité (W)} \times \text{Temps (h)}$$

Par exemple pour une période de cinq minutes avec une puissance soutirée de 100 W.

$$\text{Consommation (Wh)} = 100 \times \frac{1}{12} = 8.33 \text{ Wh}$$

3. Revue littérature

La revue de littérature s'articule en trois parties. La première a pour but de présenter le thème général étudié soit la thématique des réseaux intelligents ou « smart grid » dans sa globalité. La seconde présente ensuite plus particulièrement les applications en gestion de la demande, particulièrement la gestion active de la demande. Divers travaux dans ce sous-champ sont présentés. Finalement, diverses méthodes de mesure et modélisation de la consommation énergétique sont présentées car elles sont à la base des simulations obtenues par les systèmes de gestion active présentés.

3.1 Le concept de smart-grid

Divers développements technologiques ouvrent de nouvelles possibilités pour améliorer notre gestion de l'énergie. Ces nouvelles façons plus intelligentes de gérer l'électricité sont regroupées dans le concept de « smart grid ». L'Agence internationale de l'énergie définit le smart grid en tant que « réseau électrique utilisant des technologies digitales ou avancées pour monitorer et gérer le transport d'électricité de diverses sources de génération pour répondre à la demande des utilisateurs. Les « smart grids » coordonnent les besoins et possibilités des générateurs, gestionnaires de réseaux, consommateurs et des parties prenantes du marché de l'électricité aussi efficacement que possible pour minimiser les coûts et les impacts environnementaux tout en maximisant la stabilité et la sûreté du réseau » (AIE, 2011, traduction de l'auteur)

La littérature présente d'autres définitions, parfois plus concises, mais toujours très similaires. Di Santo et al. (2015) présentent le concept et ses différentes composantes de façon détaillée. Ils définissent le smart grid comme suit: « a generation, transmission and distribution system equipped with a two-way communication system controlled by the grid operator ». D'autres auteurs tels que Liu and al. (2010) incluent également la consommation d'énergie à l'intérieur du concept de smart grid.

3.1.1 Exemples d'applications du smart grid

Afin de donner une compréhension adéquate du domaine à l'étude, il peut être nécessaire de donner un exemple d'application par groupe. Concernant la production, une application souvent étudiée est l'intégration de systèmes de génération tierces dans le réseau électrique avec par exemple l'intégration de panneaux solaires d'une maison individuelle dans le réseau. Olatomiwa et al. (2016) présentent diverses

recherches sur ce sujet avec les systèmes d'énergies hybrides avec énergies renouvelables.

Concernant les applications de distribution, un exemple souvent étudié est l'adaptation automatique du réseau de distribution aux incidents sur le réseau. Dong Jia et al. en détaillent un exemple dans l'article « Study on technology system of self-healing control in smart distribution grid » (2011).

Concernant la transmission, Bose (2010) présente deux d'applications dont le développement de nouvelles fonctions aux centres de contrôle du réseau permises par la création de nouveaux indicateurs d'état du réseau.

Finalement, concernant la consommation, de nombreux articles étudient les possibilités de variation de prix de l'énergie pour modifier les habitudes consommations des usagers. Par exemple, Kim et al. (2014) présentent une méthode de fixation adéquate du prix dans un contexte de smart grid.

3.1.2 Les composantes du smart grid

Au-delà d'une bonne compréhension des applications potentielles, il peut être nécessaire de présenter les diverses composantes des systèmes de smart grid. Ces composantes sont brièvement présentées par Di Santo et al. (2015). Le premier groupe de composantes est le groupe des capteurs ou « smart meters ». Ces capteurs permettent le captage de certaines informations telles que la consommation précise et distribuée à divers endroits du réseau et leur transmission. Ces capteurs peuvent être présents tant au niveau local d'une maison qu'au niveau des centres de contrôle du réseau. De manière générale, ils permettent une visibilité sur le réseau, essentielle à la prise de décision.

Un deuxième groupe de composantes est le groupe des appareils de génération et de stockage distribué d'énergie. Ces composantes sont principalement les panneaux solaires ou autres systèmes de production ainsi que les batteries appartenant à des utilisateurs.

Un troisième groupe est le groupe des appareils connectés ou « smart appliances ». Ce groupe est composé de tous les objets consommateurs d'énergie qui sont contrôlables à distance. De manière courante on retrouve les systèmes de chauffage et climatisation mais on peut aussi parfois retrouver les laveuses, sècheuses, voitures électriques et bien d'autres.

Finalement, une dernière composante est le système de gestion de l'énergie ou « Energy management system » (EMS) qui permet la centralisation des informations récoltées par les capteurs ainsi que le contrôle et la coordination des diverses composantes précédemment détaillées. Ainsi l'EMS pourrait à titre d'exemple réduire la température cible du système de chauffage s'il détecte une augmentation du prix de l'électricité.

Di Santo et al. (2015) ajoutent le concept de « smart home » qui regroupe les précédentes composantes dans le contexte de maisons ou appartements de particuliers. Cependant ces composantes se retrouvent de façon équivalente dans les bâtiments commerciaux ou industriels. Le terme de « smart building » pourrait alors être utilisé.

3.2 Les applications de gestion de la consommation

Tel que mentionné précédemment, un groupe particulier d'applications du smart grid vise la gestion intelligente de la consommation d'énergie. Ces applications peuvent, entre autres, permettre la réduction de la consommation totale, la réduction des coûts en énergie ou la diminution des pics de consommation.

3.2.1 Les programmes de gestion de la demande

Parmi les applications visant à contrôler la consommation, les « demand response programs » (DR) sont des programmes dans lesquels le gouvernement ou le fournisseur d'énergie met en place une politique incitant les utilisateurs à modifier leurs comportements. Il n'y a donc de manière générale pas de contrôle direct sur les actions des consommateurs mais plutôt la mise en place de propositions visant un changement ponctuel ou permanent dans les habitudes de consommation. Siano (2014) présente différents programmes de gestion de la demande. Certains se servent du prix en tant qu'incitatif avec un prix variant par bloc (« time of use rate » ou TOU), un prix spécial au pic (« critical peak pricing » ou CPP) ou un prix variant constamment selon la demande en temps réel (« real-time pricing » ou RTP). D'autres méthodes utilisent des incitatifs financiers ponctuels contre la réduction momentanée de la consommation pour préserver l'intégrité du réseau. Les incitatifs peuvent aussi être constants dans le temps lorsque les consommateurs acceptent que leur capacité maximale soit réduite en tout temps sous la décision du fournisseur d'électricité. À l'inverse, d'autres programmes permettent aux consommateurs de proposer des réductions de consommation contre incitatifs financiers.

Selon Siano, ces programmes ont de nombreux avantages. Ils permettent la réduction des coûts en énergie des consommateurs, la réduction des problèmes de réseau et un marché de l'énergie généralement plus performant. Cependant ces programmes exigent une importante implication des consommateurs et semblent inefficaces sans une participation active et régulière des utilisateurs.

3.2.2 La gestion active de la demande

Un autre groupe d'applications propose de contrôler directement la consommation des utilisateurs plutôt que de proposer des incitatifs et d'attendre une réaction. Ces applications sont catégorisées comme « active demand-side management » ou ADSM. Par l'entremise de ces applications, les fournisseurs d'énergie peuvent directement réduire la consommation des utilisateurs à certains moments pour répondre à leurs besoins. Le but n'est donc pas de réduire la consommation et de changer les habitudes des consommateurs mais plutôt de les déplacer dans le temps. L'objectif du fournisseur peut être multiple. Selon Matanallas et al. (2012) qui présentent une application de ADSM, l'objectif recherché peut être de bloquer la consommation aux pics, de déclencher certaines consommations aux creux ou de directement déplacer la consommation aux pics vers les creux de consommation.

Lorsque ces systèmes d'ADSM sont appliqués dans un contexte résidentiel, l'expression « Home energy management system » ou HEMS est souvent utilisée. Beaudin et Zareipour (2015) recensent environ trente expressions différentes pour ce concept dans leur article « Home energy management systems: A review of modelling and complexity ».

Beaudin et Zareipour présentent également dans leur article les différentes publications sur les HEMS jusqu'en 2015. Ils explorent les différences entre les approches et montrent les limites des publications actuelles. Le tableau 1 résume ces différentes approches en termes d'objectifs, d'appareils considérés, de pas de temps et de méthodes d'optimisation. Ces approches sont ensuite détaillées dans les sections suivantes. Afin de discerner les approches très étudiées des autres, le nombre d'article recensé par Beaudin et Zareipour est présenté. Le tableau 1 présente ce recensement. En annexe une matrice détaille le recensement par objectif, méthode, appareils et pas de temps pour chaque article.

Tableau 1. Liste des différentes approches explorées dans la littérature et nombre d'articles recensés

Approche choisie	Nombre d'articles recensés
Différents objectifs considérés	
Coût	16
Profil de consommation	9
Bien-être	2
Coût et bien-être	34
Coût et profil de consommation	1
Profil de Consommation et bien-être	1
Coût, profil de consommation, émission	1
Coût, profil de consommation, émission, bien-être	1
Appareils considérés (seulement plus de 5 recensements)	
Chauffage	21
Chauffe-eau	21
Air-conditionné	20
Réfrigérateur	17
Batterie	16
Véhicule électrique	16
Laveuse	15
Lave-vaisselle	12
Système de production renouvelable local	12
Sécheuse	10
Lumières	10
Congélateur	10
Poêle et four	10
Télévision	7
Pompe de piscine	6
Méthodes d'optimisation utilisées	
Programmation linéaire	12
Programmation quadratique	6
Programmation convexe	2
Programmation dynamique	3
Programmation linéaire mixte avec variables entières	20
Programmation non-linéaire mixte avec variables entières	1

Métaheuristiques	10
Heuristiques	19
Pas de temps choisis	
1 heure	37
30 minutes et 20 minutes	3
Entre 10 et 15 minutes	10
Entre 6 et 10 minutes	2
5 minutes	2
1 minute	2

3.2.2.1 Les différents objectifs potentiels

. L'objectif des HEMS est multiple et les articles considèrent différents objectifs selon les cas. Le but du système peut être de minimiser les coûts en énergie ou de maximiser le confort des utilisateurs ou de contrôler la consommation totale ou finalement de réduire les émissions. La très grande majorité des articles recensés se concentrent sur le coût pour le consommateur, et parfois considèrent simultanément l'objectif de confort. Ces considérations de coûts se situent souvent dans un contexte de prix variable. L'autre grand groupe vise le contrôle de la consommation totale. Cependant le confort des utilisateurs est très peu considéré avec cet objectif : seulement un article considérant les deux est recensé. De plus, Hassan et al. (2013) étudient l'impact sur le confort des utilisateurs des autres modèles plutôt que d'incorporer directement cette considération dans un modèle.

Les différents objectifs sont donc parfois considérés conjointement. La majorité des articles considèrent leurs objectifs choisis dans une fonction objectif pondérée. D'autres gardent simplement un objectif à optimiser et utilisent les autres comme contraintes. Par exemple, Chen et al. (2012) ont pour objectif de minimiser le coût pour l'utilisateur tout en respectant ses contraintes horaires précédemment indiquées. Finalement, Salinas et al. (2013) utilisent la formulation de frontières Pareto pour analyser les deux objectifs simultanément.

En particulier sur le contrôle de la consommation maximale, Molderink et al. présentent (2009) un modèle contrôlant un large nombre d'appareils, de la génération à la consommation. Ils présentent plusieurs objectifs dont « peak shaving » mais leur modèle vise la minimisation du coût et l'objectif concernant le pic n'est pris en compte que dans l'étude des simulations. Mets et al. (2011) se concentrent directement sur la minimisation du pic et la minimisation de la variabilité du pic. Cependant ils se

concentrent seulement sur l'utilisation des véhicules. Chen et al. (2014) visent l'atteinte d'un certain niveau cible en tout temps pour un groupe de résidences partageant un compteur commun en utilisant les appareils connectés, voitures, batteries et générateurs distribués.

En particulier sur les considérations du confort des utilisateurs, deux types de confort différents sont considérés. Le plus souvent observé dans la littérature est le confort thermique ou la satisfaction des utilisateurs concernant la température de l'habitation. Tant une réduction qu'une augmentation de cette température entraînent de l'inconfort chez les utilisateurs. Le second type de confort est le confort par rapport au temps. Les modèles contrôlant souvent les appareils des utilisateurs, certains articles considèrent que les appareils ne peuvent pas être déclenchés durant certaines périodes pour ne pas gêner les utilisateurs. A titre d'exemple, Agnetis et al. (2013) considèrent les deux types de confort. Pour les deux types de confort, la façon de les prendre en compte dans les modèles varie grandement d'un article à l'autre. Par exemple, Tiptipakorn et Lee considèrent seulement le confort thermal et considèrent un intervalle acceptable et un intervalle inacceptable. Sou et al. (2007) laissent à l'utilisateur la possibilité de donner une heure limite avant laquelle l'action de l'appareil doit être terminée et rendent la satisfaction de cette contrainte obligatoire. D'autres méthodes considèrent le confort en pénalisant par rapport à une valeur cible. La pénalisation peut être progressive, d'une forme quadratique, linéaire ou exponentielle. Par exemple, Yu et al. (2013) considèrent le confort thermal avec une température idéale et pénalisent l'objectif par écart à cette température idéale de façon quadratique. Finalement, d'autres modèles utilisent une pénalisation binaire. De cette façon ils n'interdisent pas complètement le non-respect d'une préférence mais si celle-ci n'est pas satisfaite alors l'objectif est pénalisé.

3.2.2.2 Les différents appareils considérés

Les appareils et équipements électriques couverts varient significativement d'un article à l'autre. Certains offrent une étude plus précise sur un appareil en particulier alors que d'autres présentent des modèles plus complets mais moins précis. Les appareils de consommation les plus souvent retrouvés sont les systèmes de chauffages, les climatiseurs, les chauffe-eaux, les laveuses, les sécheuses, les lave-vaisselles, les réfrigérateurs et enfin les véhicules électriques. Parfois les modèles incluent des appareils de stockage, de type batterie, ou des générateurs d'énergie souvent de source renouvelable tels des panneaux solaires. Beaudin et al. (2015) proposent une classification de ces différents appareils. Ils présentent les appareils à consommation incontrôlable, les appareils à consommation ne pouvant être arrêtée,

les appareils pouvant être arrêtés et les appareils pouvant être variés autour de leur niveau objectif. La majorité des articles se concentre sur les appareils à consommation contrôlable pouvant ou pas être arrêtés en cours de fonctionnement car c'est en utilisant ces appareils que les modèles ont le plus de potentiel. À titre d'exemple, les laveuses sont contrôlables mais ne peuvent être temporairement arrêtées. Le chargement des véhicules électriques est contrôlable et peut être mis en pause en cours de charge.

3.2.2.3 Les différentes méthodes d'optimisation

Les méthodes d'optimisation varient grandement entre les articles. Certaines sont plus adaptées selon les cas. De manière générale l'utilisation d'appareils entraîne la nécessité de variables binaires de type « on » ou « off ». Cela entraîne donc la nécessité d'utiliser des méthodes de programmations mixtes en variables entières pour les méthodes exactes. Ce sont d'ailleurs ces méthodes qui sont le plus utilisées. Quelques méthodes méta-heuristiques sont observables dans le but d'accélérer les temps de résolution. Il est à noter que tous les modèles développés ont un but opérationnel. Le temps de résolution est donc important et se doit d'être court pour permettre l'opérabilité du modèle développé.

3.2.2.4 Les différences temporelles

D'autres importantes différences entre les modèles se situent au niveau temporel. Tous visent à la planification temporelle de la consommation, les modèles doivent choisir l'horizon de planification et la granularité. Concernant l'horizon, la très grande majorité des modèles effectue une planification à la journée. Ce choix peut être motivé par la considération que le cycle redémarre à chaque journée. Cependant, il pourrait être noté que certains appareils ne sont pas utilisés à chaque journée, telle la laveuse par exemple, ce qui pourrait dans certains cas remettre en question ce choix. Concernant la granularité, la majorité des articles utilisent des intervalles de temps d'une heure. Ce choix peut réduire grandement les possibilités et la précision particulièrement avec les objectifs de gestion du profil de la consommation et des pics de consommation. Le manque de précision et de représentativité du pic avec une granularité horaire est noté par Johnson et Beausoleil (2017). Les autres articles utilisent donc souvent une granularité à la minute. Il est à noter que bien qu'un plus grand horizon et une plus grande granularité soit souhaitable pour la précision et la représentativité du modèle, l'augmentation de ces deux facteurs augmentent grandement le nombre de variables et donc la complexité du modèle. Cela peut

entraîner des non-optimalités des solutions et surtout des importantes augmentations des temps de résolution.

De très nombreuses différences sont donc observables, au niveau des objectifs, de leur méthode de traitement, des appareils considérés, des méthodes mathématiques choisies ou encore des paramètres temporels. Ces différences rendent les modèles difficilement comparables en termes de qualité car ils ne se concentrent pas exactement sur les mêmes problèmes. Les tests et les simulations effectués par les auteurs sont menés de façons très différentes avec des données diverses et créés par différents types de méthodes, détaillées dans la section suivante. Bien que non objectives, quelques notions importantes pour la comparaison des modèles sont leur applicabilité, leur simplicité et leur flexibilité.

3.3 Modélisation des paramètres

La très grande majorité des modèles observables dans la littérature est testée pour vérifier leur fonctionnement, étudier leur qualité et évaluer les améliorations atteignables sur les différents objectifs. Cependant, la réalisation de ces tests passe souvent par la simulation et nécessite l'utilisation de données. Selon les diverses caractéristiques choisies par les auteurs parmi celles présentées à la section précédente, les données nécessaires varient grandement. Ces données sont souvent difficiles et coûteuses à obtenir, particulièrement en quantité et en précision importante. Ce dernier point entraîne souvent l'utilisation de simplifications ou d'hypothèses assez larges dans la création des ensembles de données tests. Il est à noter que de nombreux articles détaillent peu les méthodes de création de ces données, particulièrement concernant le confort des utilisateurs.

Les données essentielles à tous les modèles sont les données de consommation qui permettent de savoir quelle quantité d'énergie est consommée par chaque ménage. Le but des modèles précédemment présenté étant d'optimiser le contrôle des appareils des maisons, il est nécessaire d'utiliser des données par appareil. Ces données sont souvent qualifiées de désagrégées. Le terme « end-use » est aussi souvent utilisé pour se référer à l'utilisation d'appareils par des particuliers. De nombreuses études présentent des mesures de cette consommation et la création de profils de consommation et de distribution qui permettent la création de scénarios à des fins de simulations. Les données sont souvent obtenues de deux manières. Elles peuvent être mesurées directement sur les consommations réelles des utilisateurs de façon intrusive ou être créées pour représenter la population cible de manière cohérente.

Rowland et al. (2015) recensent de nombreuses études différentes et comparent leurs caractéristiques. Ils se concentrent sur les études intrusives qui mesurent directement la consommation réelle de ménages. Les différentes études relevées se concentrent sur différentes zones géographiques et différents types d'habitations (séparées ou collées). La taille des corpus ainsi que la durée de mesure de l'étude sont très variables. Finalement, de la même façon que pour les modèles d'optimisation, la granularité temporelle de la mesure s'étend de 1 minute à 1 heure et les types d'appareils enregistrés varient. Il est à noter que ces données sont très saisonnières et les périodes de mesures trop courtes ne sont donc pas capables de saisir les profils tout au long de l'année. L'étude de ces mesures permet l'obtention directement de la quantité d'énergie consommée. Mais elle peut aussi permettre d'extrapoler indirectement les habitudes de vie et les habitudes de consommations des foyers observés. Cela permet donc la création de profils de consommation avec la probabilité qu'un foyer déclenche un appareil à un certain moment.

Deux études intrusives relevées par Rowland et al. (2015) peuvent particulièrement trouver une application dans des modèles utilisant divers appareils. Zimmermann propose en 2009 des mesures sur 400 habitations, durant un mois, en Suède, à intervalle de 10 minutes. Ils enregistrent divers appareils contrôlables tels que la laveuse, le système de chauffage ou la sècheuse par exemple. Saldanha et Beausoleil-Morrison présentent eux en 2012, la mesure de 12 habitations durant 1 an et 6 mois au Canada à un intervalle de 1 minute. Ils mesurent principalement chauffage et air conditionné mais pour un sous-groupe de maison ajoutent la sècheuse, le lave-vaisselle et le chauffe-eau. Johnson et Beausoleil-Morrison ajoutent 11 habitations en 2016 pour un total de 23 habitations mesurées. Le taille du corpus de Zimmermann permet d'assurer une meilleure représentativité des mesures, cependant la durée de la mesure sur un mois ne permet pas la saisie des variations saisonnières. Finalement, Johnson et Beausoleil-Morrison montrent dans leur article qu'un intervalle trop large de mesure ne permet pas de saisir adéquatement les pics de consommation. Armstrong et al. (2009) présentent des profils de consommations dérivés de mesures à un intervalle de cinq minutes. Les profils y sont testés contre des données réelles obtenues auprès d'Hydro-Québec. Ces profils générés synthétiquement sont testés comme représentatifs. Ils saisissent les variations saisonnières et présentent des profils pour différents types de maisons. Ils présentent les puissances soutirées pour un grand nombre d'appareils ménagers mais pas pour les besoins en chauffage.

Bien que ces données de consommations permettent l'obtention des habitudes de consommation des utilisateurs, ces habitudes peuvent être changées. Les données

ne permettent pas d'obtenir les réels besoins des personnes observées. Par exemple, les données pourraient indiquer l'habitude en jour de semaine du lancement du lave-vaisselle à 20h00 mais cette information ne dit pas si l'utilisateur en a besoin avant une certaine heure, ou s'il ne souhaite pas que l'appareil se déclenche à une heure particulière. Ces informations sont pourtant considérées dans les modèles d'optimisation. Souvent les auteurs les incluent en tant qu'inputs donnés par les utilisateurs du système. Elles sont donc également nécessaires à la simulation.

4. Méthodologie

Cette section a pour but de présenter l'approche adoptée dans la recherche, les choix effectués quant aux données ainsi que le modèle et l'algorithme créés. Elle suit directement les conclusions tirées dans la revue de littérature. Cette section contient dans un premier temps une présentation générale de la recherche et de ses différentes composantes, une présentation détaillée des données choisies et utilisées dans un second temps et finalement la présentation détaillée de l'algorithme développé.

4.1 Méthodologie générale

Comme présenté en introduction, l'opportunité à l'étude est la minimisation de la pointe de consommation énergétique dans les maisons unifamiliales en modifiant les habitudes de consommation des utilisateurs de manière peu invasive. Il est donc essentiel d'agir sur des appareils à haute consommation, qui ne demandent pas d'action humaine en continu, présents dans la grande majorité des ménages et non utilisés pour le divertissement. Les systèmes de chauffage, laveuse, sècheuse, lave-vaisselle, congélateur, réfrigérateur et les poêles possèdent ces caractéristiques. Pour tous sauf le chauffage, la consommation de ces appareils est engendrée par un déclenchement, soit automatique, soit manuel et elle suit une forme fixe. A titre d'exemple, une sècheuse demande une puissance d'environ 4 kW durant 40 minutes dès qu'elle est déclenchée, ce qui correspond à une consommation d'énergie de 2,67 kWh. Cette durée est fixe, et le déclenchement manuel. Lorsque connectés, ces appareils sont contrôlables à distance, cependant comme leur consommation est fixe, seul leur déclenchement peut être contrôlé. Cependant pour le chauffage, il est possible de contrôler non-seulement le déclenchement mais également la consommation selon les besoins en chauffage. Il est à noter que ces besoins dépendent des utilisateurs, des caractéristiques de la maison et de la température extérieure. Ces divers points permettent de traiter le chauffage par la quantité de chauffage utilisée comme une variable positive et les autres appareils par le déclenchement en utilisant des variables binaires. Le but étant la minimisation du pic de consommation, soit la minimisation de la puissance maximale utilisée dans l'année par un foyer, un modèle d'optimisation est la méthode la plus adaptée. En particulier, ce modèle suit un objectif min-max pour la minimisation de la puissance maximale. Il utilise les variables précédemment présentées de déclenchements d'appareils et de quantité de chauffage utilisée. Le modèle effectue l'optimisation à travers le temps. Il est à noter que chaque appareil ménager contribue au chauffage de l'air à son utilisation. De la même façon, la simple occupation de la maison contribue au

chauffage. Cependant ces contributions sont marginales et très variables selon chaque utilisation, elles ne seront donc pas considérées dans cette étude.

Concernant les choix en matière de temps, deux points sont à considérer : la longueur d'un intervalle de temps et la longueur de la période d'optimisation. Concernant la longueur d'un intervalle, un intervalle plus petit permet une plus grande précision en termes de consommation et une plus grande flexibilité pour le modèle, cependant il complexifie grandement le problème sans garantie de résultats plus avantageux. Tel que présenté dans la revue de littérature, un intervalle de cinq minutes permet un niveau de précision adéquat. Dans le cadre de notre problème, cet intervalle est adapté car il garde le modèle à une taille raisonnable et représente adéquatement les besoins des utilisateurs. Concernant l'horizon temporel de l'optimisation, une durée d'une journée, soit 288 périodes de 5 minutes, est le plus adapté. En effet, il serait inapproprié de décaler l'utilisation d'un appareil à une journée ultérieure ou plus, rendant un intervalle de plus d'une journée non adapté. Sélectionner un intervalle plus long complexifierait donc sans bénéfice le modèle.

Le modèle se base donc sur les besoins en chauffage créés par les températures extérieures et les besoins en appareils ménagers des utilisateurs aux cinq minutes durant une journée pour proposer une alternative optimisée avec un pic de consommation moins important. Pour permettre une amélioration, le modèle doit permettre une certaine flexibilité sur les variables mais le respect des besoins de l'utilisateur oblige à limiter cette flexibilité. Il est donc nécessaire de fixer des degrés de liberté sur les variations possibles de la chaleur intérieure à la maison et sur le décalage temporel du déclenchement des appareils. Divers degrés de libertés seront aussi considérés pour analyser la sensibilité.

4.2 Données sélectionnées

Deux types de données sont utilisés dans ce travail, les données permettant les simulations et les données constituant les constantes du modèle. En effet, afin d'évaluer les économies potentielles permises par le modèle, celui-ci est testé sur un ensemble de données. Ces deux groupes de données sont présentés ici.

4.2.1 Données de simulation

4.2.1.1 Besoins en déclenchements d'électroménagers et capacités utilisés des appareils

Comme présenté dans la revue de littérature, Armstrong et al., ont créé de façon synthétique des profils de consommation pour des maisons unifamiliales au Canada. Ainsi leurs données présentent 9 maisons, avec des profils de grands consommateurs,

consommateurs moyens ou petits consommateurs. Ces données présentent pour des intervalles de cinq minutes quelle capacité est utilisée lors de l'intervalle par chaque appareil. Sont ainsi présentées, les capacités pour la lumière, la sècheuse, la laveuse, le poêle, le lave-vaisselle, le réfrigérateur, le congélateur et un total pour les autres appareils. Comme mentionné précédemment, lumière et autres appareils ne sont pas adaptés à l'optimisation, seuls les autres champs sont donc utilisés. Cette matrice de puissance soutirée par cinq minutes par appareil permet d'obtenir deux données : les besoins des utilisateurs pour le déclenchement des appareils et les capacités utilisées par les appareils lors de leur cycle. La matrice de capacité permet donc la création d'une matrice de demande binaire en déclenchement d'appareils pour les 6 appareils considérés aux cinq minutes. Le tableau 2 ci-après présente un exemple de matrice de demande en déclenchement. Les « 1 » représentent une demande de déclenchement.

Tableau 2. Exemple de matrice de demande de déclenchement des appareils dans le temps

Temps	Réfrigérateur	Poêle	Lave-vaisselle	Laveuse	Sècheuse	Congélateur
00h00	0	0	0	0	0	0
00h05	0	0	0	0	0	0
00h10	0	0	0	0	0	0
00h15	0	0	0	0	0	0
00h20	0	0	0	0	0	0
00h25	0	0	0	0	0	0
00h30	0	0	0	0	0	0
00h35	0	0	0	0	0	0
00h40	0	0	0	0	0	0
00h45	0	0	0	0	0	0
00h50	1	0	0	0	0	0
00h55	0	0	0	0	0	0
01h00	0	0	0	0	0	0
01h05	0	0	0	0	0	0
01h10	0	0	0	0	0	1
01h15	0	0	0	0	0	0
01h20	0	0	0	0	0	0

Elle permet également l'obtention des cycles de capacité suivants pour les 6 appareils à chaque utilisation. Il est à noter que la durée du cycle est fixe pour tous les appareils sauf le poêle. Pour celui-ci une durée moyenne est donc utilisée.

Tableau 3. Matrice des capacités utilisées induites après le déclenchement par appareil en W

Période	Réfrigérateur	Poêle	Lave-vaisselle	Laveuse	Sécheuse	Congélateur
Temps 1 (déclenchement)	80	1600	467	505	4115	61
Temps 2	251	1600	467	505	4115	191
Temps 3	242	1600	467	505	4115	185
Temps 4	242	1600	467	0	4115	185
Temps 5	234	1600	467	0	4115	178
Temps 6	160	1600	467	505	4115	122
Temps 7		1600	467	505	4115	
Temps 8		1600	467	505	4115	
Temps 9		1600	467		4115	
Temps 10					4115	

4.2.2.2 Températures extérieures pour besoins en chauffage

Ces données précédemment présentées permettent donc de traiter la partie électroménagère du modèle mais pas la partie liée au chauffage. L'énergie nécessaire pour chauffer une maison dépend directement de la température extérieure. Il est donc nécessaire d'obtenir des données représentatives de température. La région à l'étude étant ici le Québec, une station de mesure de Montréal est choisie car elle représente adéquatement un plus vaste nombre de foyers. La station choisie est située à l'aéroport Pierre-Elliott Trudeau de Montréal. Une année de données est utilisée car les températures étant saisonnières, il est nécessaire de considérer toutes les saisons. L'année 2016 est utilisée afin d'utiliser des données récentes. Ces données sont recueillies et mises à disposition par Climat Québec, un organisme public (elles peuvent être téléchargées à <http://climat.meteo.gc.ca>). Pour les données historiques, seules des données horaires sont disponibles. Ces données sont donc interpolées¹ linéairement pour créer les températures aux cinq minutes pour l'année 2016.

Ces données temporelles de températures et de demande en déclenchement permettent donc de définir les besoins en chauffage et en puissance d'électroménagers pour les maisons et serviront de bases pour les optimisations afin

¹ La méthode d'interpolation choisie est l'interpolation linéaire. À titre d'exemple, si la température enregistrée à 09h00 est 10°C et 11,2°C à 10h00 alors la température interpolée à 09h05 est 10,1°C et celle à 09h30 est 10,6°C.

d'évaluer les économies possibles et d'évaluer les formes de prix possibles pour inciter les comportements.

4.2.3 Constantes du modèle

Au-delà des données permettant de créer des scénarios à étudier, le modèle utilise diverses constantes, leur choix est présenté ici. Des constantes sont utilisées relativement aux prix et au chauffage.

4.2.3.1 Constantes de prix

Divers schémas tarifaires sont considérés et sont utilisés comme objectif d'optimisation afin d'évaluer les comportements qui seraient incités par ces prix et les résultats atteignables.

Tarif à prix uniforme

La première forme de prix considérée est la forme actuellement en vigueur au Québec, un prix fixe et constant dans le temps par kWh, soit facturant l'énergie consommée. Le taux réel appliqué au Québec entre le 1^{er} avril 2017 et le 31 mars 2018 est donc utilisé, celui-ci est de 0,0582 \$/kWh pour les 33 premiers kWh puis 0,0892 \$/kWh pour tous les kWh suivants.

Tarif à prix variable selon le moment

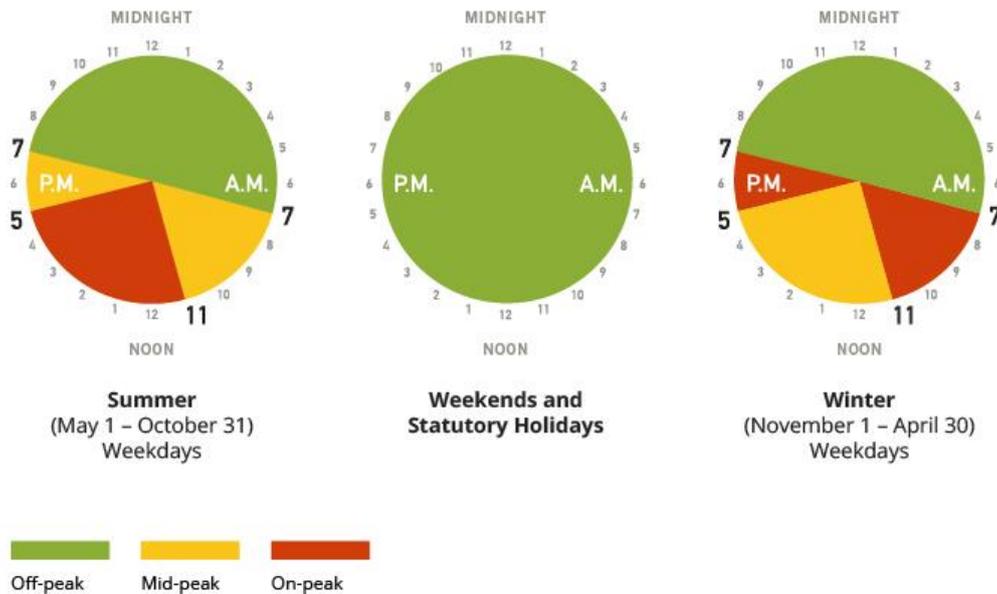
Une deuxième forme de prix considérée est un prix variable en fonction du moment de la journée. Cette forme est populaire dans de nombreux pays et est utilisée en Ontario. Son but est d'inciter les utilisateurs à décaler certaines utilisations vers des périodes moins dispendieuses où la demande est généralement plus faible. Ainsi, ce schéma vise à inciter une répartition temporelle la demande pour réduire les pics de consommation. Le tarif est toujours en fonction des kWh et c'est donc la consommation qui est facturée. Les prix par kWh et les intervalles des périodes varient d'un pays à un autre. Les prix et intervalles utilisés en Ontario sont ici choisis car leur utilisation pourrait être justifiée au Québec. Les tarifs en vigueur sont tirés du Ontario Energy Board (<https://www.oeb.ca/rates-and-your-bill/electricity-rates>).

Tableau 4. Tableaux des prix avec tarif sur consommation variable selon le moment

Période	Tarif (¢/kWh)
Hors-pic	6,50
Pic moyen	9,50
Durant le pic	13,2

Les périodes de pic et hors pic varient selon le jour de la semaine et la saison comme suit (<https://www.oeb.ca/rates-and-your-bill/electricity-rates/managing-costs-time-use-rates>) :

Figure 2. Horaires des périodes de pic pour tarif sur consommation variable selon le moment (Ontario Energy Board)



On s'intéresse en particulier à la situation hivernale et puisque l'on souhaite un prix variable, seul le tarif en vigueur durant la semaine est pertinent. Le modèle utilisera donc le tarif appliqué durant un jour de semaine en hiver en Ontario.

Tableau 5. Tableaux des prix à chaque heure avec tarif sur consommation variable selon le moment

Période	Tarif (¢/kWh)
00h00 à 07h00	6,50
07h00 à 11h00	13,2
11h00 à 17h00	9,50
17h00 à 19h00	13,2
19h00 à 00h00	6,50

Tarif considérant la puissance et l'énergie

Une troisième forme de prix est considérée, qui facture l'énergie consommée en kWh mais également la demande en puissance en kW. Cette forme a également pour but d'inciter les utilisateurs à répartir leur consommation d'énergie dans le temps afin

de minimiser la partie capacité de leur facture et donc le pic de consommation électrique du côté du fournisseur en électricité.

Cette forme de prix est observable dans quelques régions mais elle est moins répandue que la forme précédente. Elle est en partie observable au Québec, mais seulement pour les appels de puissance supérieurs à 50 kW. Ce tarif facture donc seulement les kW utilisés après les 50 premiers. Cette limite minimale pour l'application de ce tarif le rend non applicable pour les maisons unifamiliales classiques ici à l'étude. Celles-ci ont en effet des appels de puissance maximums bien inférieurs, de l'ordre de 20-30 kW maximum. Un tarif facturant les kW utilisés dès les premiers est cependant observable pour les clients commerciaux et industriels ayant des appels de puissance supérieurs à 50 kW. Ce tarif sera donc étudié pour déterminer si son utilisation dans le secteur résidentiel pourrait créer l'incitatif recherché. Le tarif est structuré comme suit : (<http://www.hydroquebec.com/affaires/tarifs-et-facture/tarifcation/tarifs-affaires-electricite/tarif-m/>).

Tableau 6. Tableaux des prix avec tarif sur consommation et puissance

Prix mensuel de capacité (\$/kW)	14,43
Prix consommation (\$/kWh)	0,04970

Son utilisation est pertinente car il est déjà utilisé par Hydro-Québec, et pourrait réalistiquement être adapté et transféré au marché de la consommation résidentielle.

4.2.3.2 Constante de chauffage

Le deuxième groupe de constantes a trait à l'énergie consommée par le chauffage. Le modèle donne la possibilité de chauffer ou non, de surchauffer temporairement ou de sous-chauffer et considère la perte de chaleur dans le temps dépendante de la température extérieure.

Énergie dépensée par le chauffage et énergie perdue

Afin de chauffer une maison d'un degré, une certaine quantité d'énergie (en kWh) est nécessaire. Cette quantité dépend de la taille de la maison. Par soucis de cohérence, le modèle utilise une maison de la taille considérée dans l'article de Armstrong et al. soit avec une surface habitable de 144 m², soit une maison de 12 m par 12 m. Une hauteur de plafond de 2,5 mètres est utilisée. Ainsi une maison classique contient 360 m³ d'air.

Cette taille de maison considérée par Armstrong et al. et réutilisée ici peut être confirmée par les statistiques de consommation d'énergie secondaire et émissions de

GES des maisons unifamiliales par utilisation finale pour le Québec. Cette statistique est fournie par le Gouvernement du Canada.

(http://oeo.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/menus/evolution/tableaux_complets/liste.cfm) Le tableau indique que le Québec contient aujourd'hui 238 millions de m² de surface habitable dans des maisons unifamiliales pour 1 630 000 ménages de ce type, soit 146 m² en moyenne par habitation.

L'énergie nécessaire pour chauffer un matériau est calculée par la formule suivante :

$$Q = c_p \times m \times \Delta T$$

où Q est la quantité d'énergie nécessaire en kJ, c_p est la chaleur massique de l'élément chauffé (1,0005 pour de l'air à 20°C), m est la masse en kg à chauffer et ΔT la différence entre la température actuelle de l'élément et la température désirée.

En particulier pour le problème, on remplace la masse par le volume fois la masse volumique.²

$$Q = c_{p\ air} \times V_{air} \times \rho_{air} \times \Delta T$$

Ainsi, l'utilisation de 1 W de chauffage entraînera l'augmentation de la température de l'air de 1/123 degré Celsius, autrement dit, chauffer la maison d'un degré demandera 123 Wh. Ces formules nécessaires au calcul de la constante peuvent être trouvées dans de nombreuses sources professionnelles d'ingénierie mécanique entre autres sur le site (https://www.engineeringtoolbox.com/heat-work-energy-d_292.html).

La seconde constante nécessaire à la modélisation du chauffage est la constante de déperdition thermique qui permet de modéliser la quantité de chaleur

² Dans le contexte du problème à l'étude :

$$Q = c_{p\ air} V_{air} \rho_{air} \Delta T$$

$$Q(kJ) = 1,0005 \times 360 \times 1,225 \times \Delta T$$

$$Q(kWh) = 441,22 \times \Delta T \frac{1}{3600} = 0,123 \times \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{Q}{0,123} \text{ avec } \Delta T \text{ en degré Celsius et } Q \text{ en kWh.}$$

perdue par l'habitation dans le temps. Cette quantité dépend de la température extérieure, de la surface de contact avec l'extérieur (surface des murs, fenêtres et autres) et du temps de mesure. Cette quantité peut être calculée par la loi de Fourier (présentées ici par l'université de Lyon 1 <http://ilm-perso.univ-lyon1.fr/~asmiquel/teaching/Thermodynamique/thermo10.pdf>).

Le modèle est développé pour des périodes de cinq minutes, ces périodes seront donc utilisées. La surface de contact avec l'extérieur est approximée par les dimensions présentées auparavant de 12 mètres par 12 mètres par 2,5 mètres. La surface des murs composée de fenêtres est estimée à 30%. La pertinence de ce 30% est confirmée par Autodesk, entreprise de design soutenable, dans leur article « *Aperture placement* » (<https://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/aperture-placement-area>) où le ratio fenêtre/mur est décrit comme devant toujours être inférieur à 40% et idéal autour de 30% pour une région au climat froid. Ces dimensions de la maison considérée supposent donc une surface de mur de 84 m², une surface de sol et de plafond de de 144 m² et une surface de fenêtre de 36 m². La quantité d'énergie perdue par m² de surface selon chaque matériau est approximée par le R_{SI}, ou résistance thermique d'échange d'une surface intérieure, mesurée en m²K/W ou K est la différence de température observée. Le R_{SI} utilisé pour les murs et le plafond est de 5,28, le R_{SI} pour le sol utilisé est égal à 7 et celui pour les fenêtre est égal à 1,25. La présence de divers matériaux oblige le calcul d'une résistance équivalente qui représente la résistance globale de la maison. Ce calcul est permis par la loi de Kirchhoff (loi présentée par l'université de Moncton à http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier_gabriel/Circuits/GELE2112_Notes2.pdf). Dans le cadre de ce travail, l'application de cette loi pour obtenir la résistance équivalente a été aidée par un document du professeur de Polytechnique Montréal Michel Bernier nommé « *Passive Thermal Survivability Estimator* ». ³

³ Dans le contexte du problème à l'étude :

$$Q_t = A_i \frac{T_t - T_{ext_t}}{R_{SI}} \Delta t$$

$$Q_t(J) = 108,8(T_t - T_{ext_t})300$$

$$Q_t(J) = 108,8(T_t - T_{ext_t})300 = 32640(T_t - T_{ext_t})$$

$$Q_t(Wh) = \frac{32640}{3600}(T_t - T_{ext_t}) = 9(T_t - T_{ext_t})$$

$$\dot{q}_{chauffage} = A \frac{T_t - T_{extérieure}}{R_{SI}} = \frac{Q}{\Delta t}$$
$$Q_t = A_i \frac{T_t - T_{ext_t}}{R_{SI}} \Delta t$$

Ainsi la quantité d'énergie perdue par la maison durant chaque période de 5 minutes est égale à 9 fois la différence entre la température de cette maison particulière et la température extérieure. Ces formules nécessaires au calcul de cette constantes sont entre autres enseignés dans le cours ENE6510 *Modélisation énergétique des bâtiments* de Michel Bernier à Polytechnique (<http://www.polymtl.ca/etudes/cours/details.php?sigle=ENE6510>). La corporation des maîtres électriciens du Québec propose une table de calcul des déperditions thermiques qui utilise le même raisonnement. Cette table peut être obtenue page 10 dans le rapport de septembre-octobre 2015 (<https://www.cmeq.org/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=14679&token=de49d14b5b2078a1c24f93812b71af7a910767fe>).

Finalement, il n'est pas possible de chauffer une maison plus rapidement que ce que ses appareils de chauffage le permettent. Une maison de 144 m² est considérée posséder 8 plinthes ayant chacune 1 kW de capacité, cela représente une plinthe pour 33 m² de surface de mur et de plafond soit une quantité raisonnable. Il est donc possible d'ajouter 8×1000/12 = 667 Wh d'énergie en chauffage par période de cinq minutes.

4.3 Le modèle d'optimisation

Cette section vise à présenter le modèle d'optimisation ici créé et utilisé dans l'étude des résultats. Elle vise à donner une compréhension suffisante permettant la réutilisation du modèle et son adaptation pour des travaux subséquents. Elle présentera d'abord les paramètres utilisés et les diverses notations, puis les variables choisies puis les différentes fonctions, les objectifs utilisables et enfin les contraintes, tant les contraintes réelles dans le contexte du problème que les artificielles utilisées à des fins mathématiques.

4.3.1 Paramètres et notations utilisés

Indices :

- $T \in \{1 ; 288\}$ représente l'ensemble des périodes de cinq minutes présentes dans une journée
- $I \in \{1 ; 6\}$ représente l'ensemble des appareils considérés

- $N \in \{-L ; L\}$ représente l'ensemble des temps de déclenchements possibles selon le degré de liberté choisi.

D_{it} est binaire et représente la demande de déclenchement de l'appareil i au temps t .

C_{it} est décimal et représente la consommation au temps t engendrée par l'appareil i démarré au temps t

E_t est décimal et représente la température extérieure au temps t en degrés Celsius

L est entier et représente le degré de liberté dans le déplacement des allumages des appareils

P_t est décimal et représente le prix de la consommation électrique au temps t en \$/kWh

P_{f1} est décimal et représente le prix pour la première tranche de consommation dans le schéma de prix facturant la consommation à prix fixe en \$/kWh

P_{f2} est décimal et représente le prix pour la deuxième tranche de consommation dans le schéma de prix facturant la consommation à prix fixe en \$/kWh

P_c est décimal et représente le prix facturé pour la consommation dans le schéma de prix dual facturant capacité et consommation \$/kWh

P_{fc} est décimal et représente le prix facturé pour la capacité dans le schéma de prix dual facturant capacité et consommation \$/kW

4.3.2 Variables du modèle

Les variables utilisées dans le modèle peuvent être catégorisées en 4 types, celles de contrôle direct sont les principales, les contraignantes sont utilisées pour fixer des contraintes, celles des résultats sont seulement pour l'export et les variables artificielles ne sont utilisées qu'à des fins d'optimisation.

Variables de contrôle direct :

- x_{it} est binaire et représente le déclenchement de l'appareil i au temps t
- y_t est continu et représente l'énergie de chauffage consommée au temps t en Wh

Variables intermédiaires contraignantes :

- j_t est continu et représente la température intérieure de la maison au temps t en degré Celsius

Variables intermédiaires de résultat :

- Cap_t est décimal et représente la puissance soutirée au temps t en W
- $Conso_t$ est décimal et représente l'électricité consommée au temps t en Wh

Variables artificielles :

- z est décimal et représente la puissance maximale soutirée en W

4.3.3 Différentes fonctions objectifs

Afin d'évaluer les comportements incités par les différents formats de prix considérés, divers fonctions objectifs sont créées, chacune représentant le tarif payé par un utilisateur selon un format de prix en particulier. Ainsi l'optimisation fournit le comportement optimisé d'un utilisateur permettant d'évaluer si le format de prix est adapté pour créer le comportement désiré et d'évaluer les résultats qui sont atteignables en optimisant les comportements par rapport à une consommation non optimisée.

Les trois fonctions visent à minimiser le coût total en \$.

A - Fonction pour le format de prix sur la consommation fixe

Minimiser Consommation \times Prix – Min(Consommation, 33) \times Réduction pour premiers kWh

$$\text{Minimiser} \quad \left(\frac{\sum_i \sum_t \sum_{t'} x_{it} \times C_{itt'}}{12} + \sum_t y_t \right) \times \frac{Pf2}{1000}$$

$$- \text{Min} \left(\left(\frac{\sum_i \sum_t \sum_{t'} x_{it} \times C_{itt'}}{12} + \sum_t y_t \right), 33 \right) \times \frac{Pf2 - Pf1}{1000}$$

B - Fonction pour le format de prix sur la consommation à prix variant dans le temps

$$\text{Minimiser} \quad \left(\frac{\sum_i \sum_t \sum_{t'} x_{it} \times C_{itt'} \times P_t}{12 \times 1000} \right) + \sum_t y_t \times \frac{p_t}{1000}$$

C - Fonction pour le format de prix dual facturant consommation et capacité

Le coût de capacité étant un coût mensuel, le coût facturé pour une journée est égal à la puissance soutirée multipliée par $\frac{1}{30}$ -ème du coût mensuel.

$$\text{Minimiser} \left(\frac{\sum_i \sum_t \sum_{t'} x_{it} \times c_{itt'}}{12} + \sum_t y_t \right) \times \frac{Pfc}{1000} + z \times \frac{pc}{1000} \times \frac{1}{30}$$

Une dernière fonction objectif est considérée et vise à mesurer si les fonctions objectifs précédentes encouragent bien les comportements désirés visant à minimiser le pic de consommation énergétique. Cette fonction sert donc à minimiser le pic, soit :

D - Fonction objectif de minimisation du pic

Minimiser z

4.3.4 Contraintes du modèle

Cette section vise à présenter les différentes contraintes utilisées dans le modèle. Elles y sont explicitées et leur formulation mathématique est présentée. Elles remplissent différents rôles. Certaines permettent la vérification de contraintes réelles des utilisateurs concernant la température et les besoins en appareils ménagers. Finalement des contraintes permettent de fixer les variables intermédiaires et les variables artificielles du modèle.

4.3.4.1 Contraintes des utilisateurs

Gestion des appareils

Trois contraintes permettent d'assurer une gestion des appareils adéquate. Ces contraintes visent à assurer la satisfaction des demandes d'utilisation, sans trop déplacer dans le temps les comportements et sans lancer plusieurs fois le même appareil simultanément.

Satisfaction de toutes les demandes ou autant de démarrages que demandé

L'égalité :

$$\mathbf{1} \quad \sum_t x_{it} = \sum_t D_{it} \quad , \quad \forall i$$

permet d'assurer que pour chaque appareil, on retrouve autant de démarrages dans la matrice résultat que dans la matrice de demande. Ainsi le modèle assure que chaque demande d'utilisation de l'utilisateur est remplie.

Respect des habitudes des utilisateurs ou limite du déplacement du démarrage

On considère ici le paramètre L , défini précédemment comme : L est entier et représente le degré de liberté dans le déplacement des allumages des appareils

L'inégalité :

$$2 \quad \left(\sum_{n=-L}^L x_{i;t+n} \right) * D_{i;t} \geq \left(\sum_{n=-L}^L D_{i;t+n} \right) * D_{i;t} , \quad \forall i, \forall t \in [L+1; 288-L]$$

permet d'assurer que pour chaque appareil, le modèle autorise de décaler le démarrage de L périodes vers l'arrière et L périodes vers l'avant maximum. Cette contrainte n'est pas utilisable pour les L premières et L dernières périodes. La contrainte pour $t = L+1$ permet d'assurer le respect de la contrainte pour un démarrage demandé au temps 1. La multiplication par $D_{i;t}$ permet de n'activer cette contrainte que pour les périodes ou un déclenchement est demandé.

Attente de la fin d'un cycle avant relancement ou pas de démarrage avant fin du précédent

La non-égalité :

$$3 \quad \sum_{n=1}^{DC} x_{i;t+n} \leq 1 \quad \forall i, \forall t \in [1; 288-10]$$

permet d'assurer que pour chaque appareil, le modèle ne permet pas le déclenchement d'un appareil plus d'une fois en DC périodes. DC correspond à la durée du cycle de chaque appareil. Par exemple la sècheuse a une durée de cycle de 10 périodes ou 50 minutes. Ainsi le temps de cycle de chaque appareil est respecté et la contrainte logique qu'un appareil ne peut compléter deux cycles à la fois est vérifiée.

Gestion de la température

Variation de la température intérieure selon l'ajout de chaleur et la perte due à la température extérieure

La température intérieure varie d'une période à l'autre selon la quantité de chaleur ajoutée à la maison et la quantité de chaleur perdue par transfert de chaleur et infiltration de l'air extérieur. Les constantes utilisées dans cette contrainte sont explicitées dans la section des constantes liées à la chaleur.⁴

⁴Dans le contexte du problème à l'étude, la température initiale est fixée à 20°C.

ainsi $j_1 = 20$

La variation de la température intérieure est contrôlée par l'égalité :

$$4 \quad j_t = j_{t-1} + \frac{y_t}{123} - \frac{9}{123} * \max\{0, j_{t-1} - E_t\}, \quad \forall t \in [2; 288]$$

Respect du confort thermique des utilisateurs ou température moyenne à 20°C et toujours entre 18 et 24

Afin de garder le confort des utilisateurs à un niveau acceptable, le modèle limite les variations de température possible. Ainsi la température intérieure du domicile doit toujours être supérieure à 18°C et inférieure à 24°C. De la même façon, pour ne pas permettre un sous-chauffage permanent à 18°C, le modèle contraint que la température moyenne sur la journée soit 20°C.

Les fonctions suivantes assurent ces contraintes :

$$5 \quad j_t \geq 18, \quad \forall t \text{ et } j_t \leq 24, \quad \forall t$$

$$6 \quad \frac{\sum_t j_t}{288} \geq 20$$

Limitations de l'ajout de chauffage possible

D'une façon logique, la quantité de chaleur ajoutable à une maison en une période de cinq minutes est limitée par la capacité et le nombre de ses appareils de chauffage. Également, l'ajout de chaleur est toujours positif. Comme présenté dans la section des constantes, la maison considérée possède 8 plinthes de 1 000 W de capacité.

Les fonctions suivantes assurent ces contraintes :

$$7 \quad y_t \geq 0, \quad \forall t \text{ et } y_t \leq 8 * 1000 * \frac{1}{12}, \quad \forall t$$

Binarité de x_{it}

$$8 \quad x_{it} \text{ binaire}$$

4.3.4.2 Contraintes permettant la création de variables artificielles et intermédiaires

Une contrainte vise la fixation de la variable artificielle représentant la puissance soutirée maximale sur l'ensemble des périodes. Cette contrainte est nécessaire.

Également, plusieurs contraintes permettent la fixation de variables intermédiaires. Ces contraintes sont facultatives et ne servent qu'à la simplification du

modèle et à l'export des résultats. Deux contraintes permettent la fixation de la consommation d'électricité en Wh pour chaque période de cinq minutes et la fixation de la puissance soutirée en W pour chaque période de cinq minutes.

Puissance soutirée maximale

L'inégalité suivante permet la fixation de la variable artificielle z représentant la puissance soutirée maximale :

$$\mathbf{9} \quad \sum_i \sum_t x_{it} * C_{itt'} + y_{t'} * 12 \leq z \quad , \quad \forall t' \in T$$

Variables intermédiaires utilisées

Les égalités suivantes permettent la fixation de variables intermédiaires pertinentes :

$$\mathbf{10} \quad cap_{t'} = \sum_i \sum_t x_{it} * C_{itt'} + y_{t'} * 12 \quad , \quad \forall t' \in T$$

$$\mathbf{11} \quad conso_{t'} = \sum_i \sum_t \frac{x_{it} * C_{itt'}}{12} + y_{t'} \quad , \quad \forall t' \in T$$

Le modèle a été écrit en optimization programming language (OPL) et résolu par le solveur IBM ILOG CPLEX version 12.6.3. Pour la grande majorité des occurrences ici testées, la solution est obtenue en moins d'une minute.

Ce court temps suggère que la taille du modèle pourrait être augmentée tout en gardant un temps de résolution adéquat. Les principales pistes d'augmentation de la taille sont un intervalle de temps plus précis et la gestion combinée de plusieurs maisons. L'augmentation de la précision temporelle pourrait permettre un meilleur contrôle et une meilleure représentativité des courbes de puissance soutirée. La gestion combinée de plusieurs maisons pourrait offrir des économies encore supérieures. La gestion de plusieurs journées à la fois est jugée peu pertinente car le décalage d'une utilisation d'appareil à une autre journée suppose un trop gros changement dans les habitudes des utilisateurs.

5 Analyse des résultats

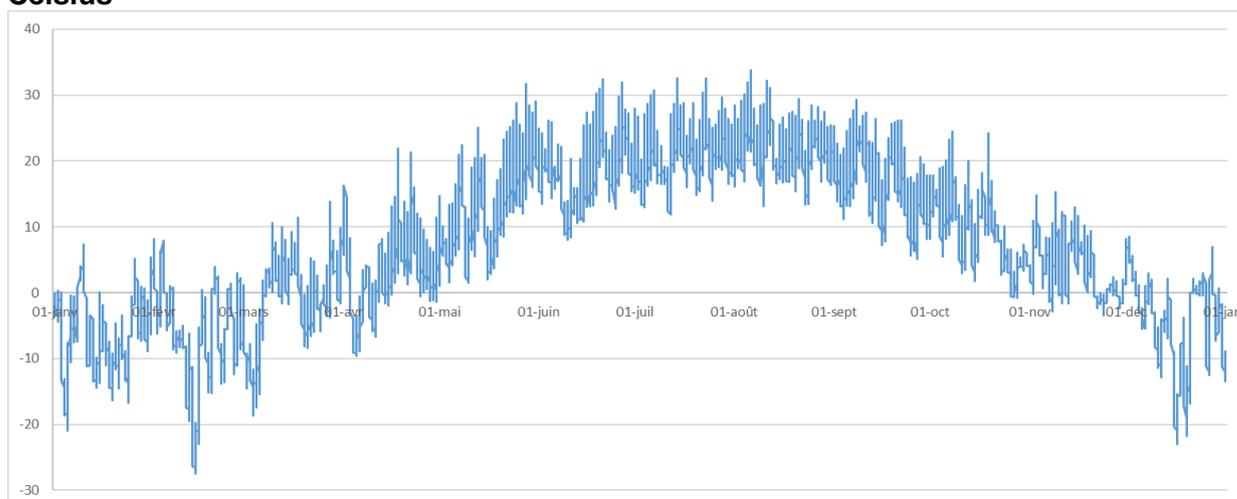
5.1 Choix des données tests

Cette section vise à présenter les données utilisées dans les tests du modèle qui serviront à évaluer les gains potentiels. Tel qu'il est mentionné dans la présentation des données, les températures extérieures considérées sont issues de 2016.

L'étude considérant le pic de consommation et non la consommation de manière générale, seules les périodes susceptibles de voir le pic de consommation sont pertinentes comme test. En effet, un jeu de données avec un faible pic de consommation pourrait potentiellement donner des résultats significatifs, seulement ces résultats n'engendreraient pas de bénéfices car le pic annuel ne serait lui pas modifié. Ainsi il est essentiel de choisir des journées-tests qui pourraient potentiellement observer le pic annuel.

La variation temporelle de la consommation et de la puissance soutirée dépend de la température extérieure. Ainsi les maisons consomment plus lorsque les températures sont très hautes (à cause de la climatisation) ou très faibles (chauffage). En particulier au Québec, c'est en hiver que les maisons consomment le plus et que le pic de consommation annuel est observable. Le pic de consommation annuel dépend donc en partie de la température extérieure et aura lieu lors d'une des journées les plus froides de l'année. Le jeu de données test est donc choisi selon ce raisonnement, en fonction de la température extérieure.

Figure 3. Températures horaires extérieures en 2016 à Montréal en degrés Celsius



La figure 3 présente les variations horaires de la température extérieure à Montréal en 2016. On peut y observer que logiquement les températures les plus basses de l'année ont été observées en hiver, ici en janvier, février et décembre avec la température la plus froide en février. Il est également intéressant de noter que seules quelques journées voient des températures inférieures à -20°C .

Le tableau 7 permet une étude plus détaillée de la répartition des températures. Seules 63 heures sur 2016 ont observé des températures inférieures à -20°C , soit l'équivalent de moins de 3 jours. Cette observation suggère qu'un traitement particulier de ces 3 journées serait possible et envisageable sans modifier trop drastiquement les comportements des utilisateurs. Il serait par exemple possible de sous-chauffer durant ces journées ou de ne pas utiliser certains appareils. Un tel traitement particulier permettrait à la puissance soutirée maximale de ne pas être influencée par ces valeurs extrêmes ce qui pourrait permettre des résultats plus significatifs.

Tableau 7. Températures horaires extérieures en 2016 à Montréal en degrés Celsius

Intervalle de température ($^{\circ}\text{C}$)	Nombre d'heures
[-30 , -25)	14
[-25 , -20)	49
[-20 , -15)	121
[-15 , -10)	358
[-10 , -5)	745
[-5, 0)	1007
[0 , 5)	1454
[5 , 10)	1064
[10 , 15)	883
[15 , 20)	1207
[20 , 25)	1229
[25 , 30)	587
[30 , 35)	65

Le tableau 8 présente la température moyenne pour chaque journée et confirme les interprétations précédentes. Ainsi seules deux journées présentent une température moyenne inférieure à -20°C .

Tableau 8. Températures moyennes journalières extérieures en 2016 à Montréal en degré Celsius

Date en 2016	Moyenne de températures (°C)
14 février	-23,19
13 février	-22,01
17 décembre	-18,78
20 décembre	-16,24
4 janvier	-15,75
5 janvier	-14,86
4 mars	-14,81
16 décembre	-14,21
11 février	-13,93
15 février	-13,56
19 janvier	-13,38
12 février	-12,51
14 janvier	-11,78
18 février	-11,69
18 décembre	-11,54
23 janvier	-11,20
2 mars	-11,11

Ainsi, pour évaluer le modèle, deux journées différentes sont considérées pertinentes, une journée représentant la journée la plus exigeante en chauffage et une journée représentant une journée avec un haut pic de consommation mais sans valeur extrême. La journée la plus exigeante est considérée être la journée avec la température moyenne minimale sur l'année. La deuxième journée considérée est la journée avec la température moyenne minimale sans considérer les journées avec une température moyenne inférieure à -20°C .

Les journées sélectionnées sont donc :

- Journée la plus froide de l'année : 14 février 2016
- Journée typique froide, mais sans extrême (température moyenne au-dessus de -20°C) : 17 décembre 2016

Les profils d'utilisation des appareils ménagers pour ces journées sont ensuite extraits. Les données de consommation électriques étant ajustées selon les saisons, il est essentiel d'utiliser les données de température et de consommation représentant une même date. Une date rapprochée pourrait également fonctionner. Cependant, pour être réalistes, les consommations des journées sélectionnées sont utilisées.

5.2 Profils de consommation induits selon les formats de prix

Cette section vise à étudier les résultats obtenus par le modèle lors des 2 journées-tests et selon les différents objectifs considérés. La visée est d'évaluer les gains atteignables et de comparer la pertinence des différents formats de prix pour inciter les comportements souhaités qui minimisent le pic de consommation énergétique.

Les paramètres sont ici considérés fixes. Les constantes utilisées sont présentées dans la section 4.2.3 pour la majorité. Le degré de liberté ici choisi pour le déplacement du déclenchement des appareils est de 6 périodes soit de 30 minutes plus tôt à 30 minutes plus tard. L'intervalle de température acceptable est considéré entre 18°C et 24°C. Pour les scénarios non optimisés, le chauffage est réglé pour permettre une température intérieure constante de 20°C.

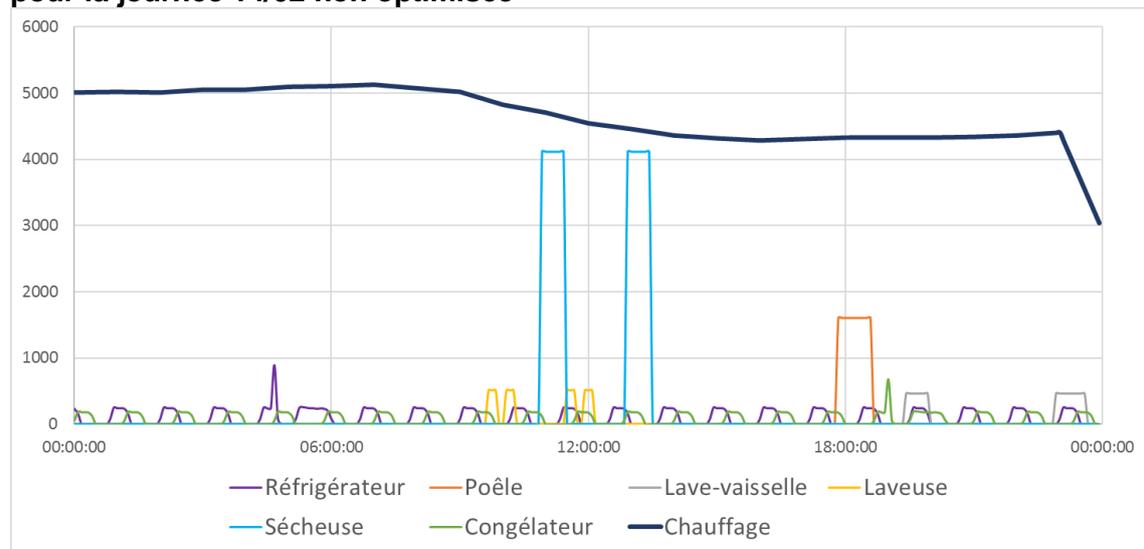
5.2.1 Comparaison des formats de prix

Comme présenté précédemment, trois formats de prix sont considérés, soient les scénarios A, B et C. Une facturation de la consommation en kWh ne variant pas dans le temps, une facturation de la consommation en kWh variant pas dans le temps selon le moment de la journée et une facturation de la consommation en kWh et de la puissance soutirée en kW.

Le but de l'étude et du modèle étant de minimiser les pics de consommation, il est pertinent d'évaluer lequel ou lesquels de ces formats induisent les comportements souhaités (la minimisation des pics de consommation) chez les utilisateurs.

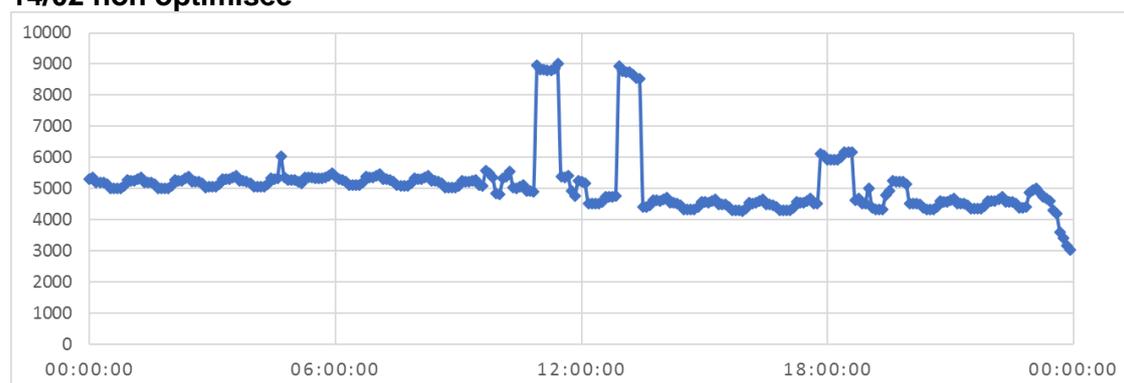
La journée la plus froide du 14 février est initialement considérée.

Figure 4. Puissance soutirée en watts par appareil par période de cinq minutes pour la journée 14/02 non optimisée



Le scénario non optimisé du 14/02/2016 peut être visualisé par la figure 4 présentant la puissance soutirée en watt chaque cinq minutes par appareil. Comme cela peut être attendu pour une journée très froide comme celle à l'étude, la majorité de la puissance soutirée est utilisée pour le chauffage. Parmi les autres appareils, la sècheuse contribue le plus significativement à la consommation, suivie par le poêle. Les autres appareils ont un impact plus limité. Le pic de consommation sera donc ici atteint lors du déclenchement de la sècheuse. Cette affirmation peut être confirmée par la capacité totale utilisée chaque cinq minutes, observable figure 5.

Figure 5. Puissance soutirée totale par période de cinq minutes pour la journée 14/02 non optimisée



Cette observation mène à l'hypothèse que la clé pour limiter le pic de consommation est de limiter le chauffage autant que possible pendant le cycle de la sècheuse et d'éviter d'utiliser d'autres appareils également durant cette période. Cette hypothèse sera testée et évaluée dans les scénarios optimisés.

La puissance soutirée maximale pour le 14/02 est 9 007.3 W ou environ 9 kW. Elle est atteinte à 11h25 durant le cycle de la sècheuse et du réfrigérateur et avec une température extérieure de -23°C.

Selon les différents formats de prix considérés dans cette étude, cette journée en particulier serait facturée :

Tableau 9. Coût facturé selon les différents formats de prix pour la journée du 14/02 non optimisée

A	Prix fixe	9,92 \$
B	Prix variable selon la période	11,04 \$
C	Prix dual capacité et consommation	10,43 \$

Le comportement optimisé des utilisateurs pour minimiser leur coût selon les différents formats de prix peut donc être considéré et comparé avec ce comportement non optimisé. La question donc posée ici est : les comportements optimisés selon les formats de prix correspondent-ils au comportement désiré minimisant la puissance soutirée maximale ?

La figure 6 présente la puissance soutirée chaque cinq minutes pour les comportements optimisés selon chaque format de prix, non optimisés et selon le comportement idéal minimisant le pic de consommation.

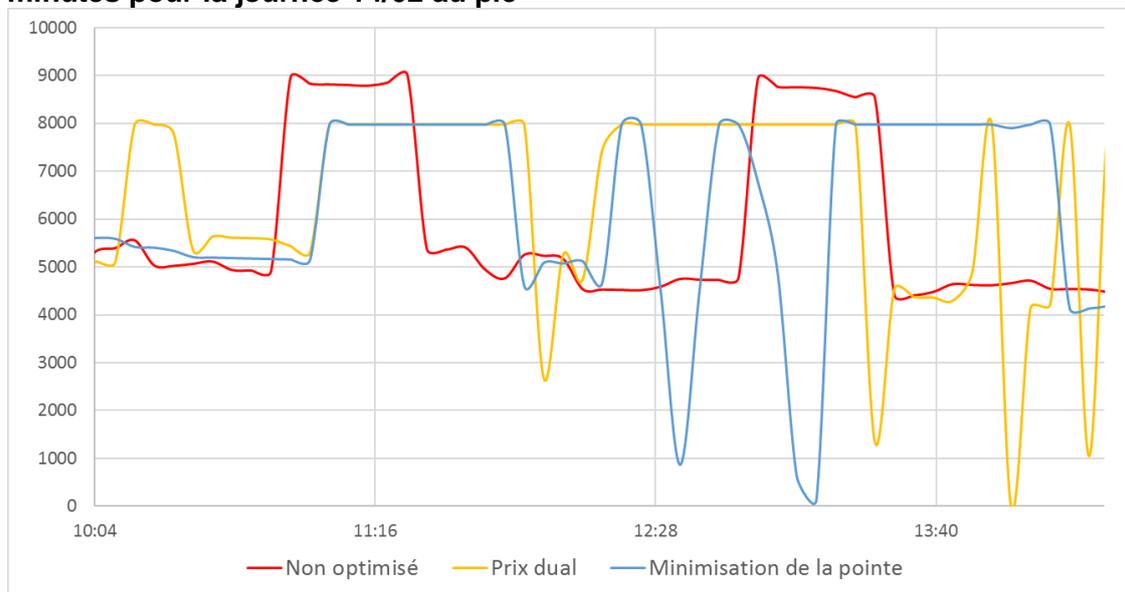
Figure 6. Puissance soutirée totale en W optimisée pour chaque format de prix par période de cinq minutes pour la journée 14/02



La quantité d'information rend la lecture difficile, cependant il est clair que le prix fixe n'incite pas un comportement qui minimise le pic de consommation électrique. De la même façon, le format de prix variable selon le temps entraîne des comportements avec des pics de consommation élevés hors des pics tarifaires, par exemple autour de 19 :00 pour la courbe grise. Ces deux formats de prix sont donc considérés non

appropriés pour inciter des comportements incitant la minimisation du pic de consommation. Une étude plus précise autour du pic entre 10h00 et 14h00 et sans ces formats de prix non pertinents est nécessaire. Elle est effectuée avec la figure 7.

Figure 7. Puissance soutirée totale en W non optimisée, optimisée pour format de prix capacité et consommation et pour capacité maximale par période de cinq minutes pour la journée 14/02 au pic



La figure 7 permet de remarquer que seul le comportement optimisé par le format de prix dual atteint le niveau du comportement désiré au moment du pic (comportement optimisé selon z).

Cette observation peut être confirmée par la puissance soutirée maximale atteinte :

Tableau 10. Puissance maximale soutirée en W selon les différents formats de prix pour la journée du 14/02

	Non optimisée	Prix fixe	Prix TOU	Prix dual	Pointe minimisée
Puissance maximale soutirée (W)	9 007,30	14 862,0	11 903,0	7 980,23	7 980,23

Ainsi les comportements incités par les formats de capacité fixe et TOU ne correspondent pas au comportement minimisant la puissance maximale soutirée. Seul un format de prix dual facturant et la capacité et la consommation permet de changer le comportement des consommateurs pour minimiser la capacité.

Il est clair que le comportement optimisé proposé par le modèle est financièrement plus avantageux pour le consommateur si le format de prix dual est appliqué. Cependant ce comportement oblige quelques changements d'habitudes et il est donc nécessaire d'évaluer si l'avantage financier est suffisant pour créer ces changements.

Le tableau 11 suggère que non-seulement l'incitatif financier est significatif mais également que le changement de format de prix entraînerait une très faible hausse des coûts pour l'utilisateur et donc peu de frustration.

Tableau 11. Coût facturé selon le format de prix dual et fixe pour un comportement optimisé ou non pour la journée du 14/02

	Comportement non optimisé	Comportement optimisé pour format dual
Format de prix dual	10,43 \$	9,99 \$
Format de prix fixe	9,92 \$	

En effet, le coût pour cette journée est moins élevé de 0,44\$ si l'utilisateur modifie ses habitudes, ce qui correspond à plus de 160\$ sur l'année. Également, le coût est seulement 7 cents plus cher que l'état actuel (comportement non optimisé avec prix fixe). Cela suggère qu'une modification du format de prix ne serait pas forcément pas mal vue par les consommateurs. Il est à noter que le prix facturé pourrait être ajusté pour entraîner une réduction de coût pour l'utilisateur tout en créant un important incitatif financier d'adopter le comportement souhaité. Ce point sera étudié dans l'étude de sensibilité à la fin de la recherche.

5.2.2 Évaluation sur les données tests

5.2.2.1 Journée A

La section précédente a permis de montrer que le format de prix dual était adapté pour inciter le comportement minimisant le pic de consommation électrique et que ce format pourrait être accepté par les consommateurs car il pourrait diminuer leurs factures. La deuxième partie de la question de recherche s'interroge sur quels résultats sont atteignables avec un comportement optimisé ou quel pic de consommation peut être atteint. L'étude évalue donc les résultats obtenus pour le comportement optimisé pour le format de prix dual contre le comportement non optimisé et effectue cette évaluation sur les deux journées-tests précédemment sélectionnées.

Pour la journée A du 14 février, la puissance soutirée par le comportement optimisé et non optimisé peut être visualisée sur la figure 8.

Figure 8. Puissance soutirée totale en W non optimisée, optimisée pour format de prix capacité et consommation par période de cinq minutes pour la journée 14/02



La puissance soutirée maximale atteinte pour les deux cas est :

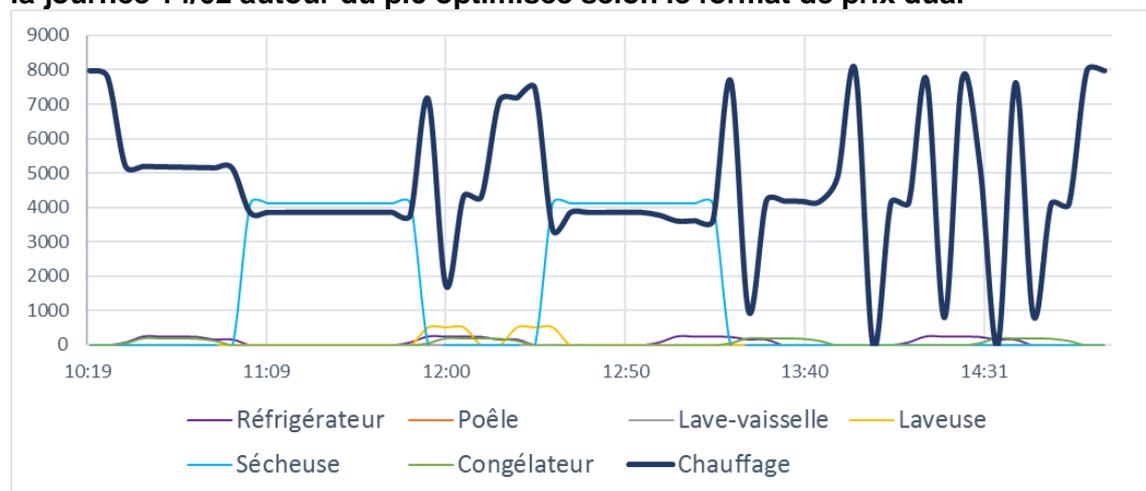
Tableau 12. Puissance maximale soutirée en W selon les différents formats de prix pour la journée du 14/02

	Comportement non optimisé	Comportement optimisé pour prix dual
Puissance soutirée maximale (W)	9 007,3	7 980,2

On observe donc une diminution de du pic atteint de 1 027,1 W soit une baisse de 11,4% entre le non optimisé et l'optimisé selon le prix dual. Cette diminution est permise par un traitement particulier autour des pics dus à la sècheuse entre 11h00 et 14h00.

Le graphique de puissance soutirée présente une grande différence au niveau de la forme des courbes. La courbe non optimisée présente moins de variations que l'optimisée. Cela provient du fait que le modèle décide parfois de ne pas chauffer du tout durant une période de cinq minutes quitte à chauffer plus par la suite alors que le non optimisé chauffe en permanence de façon assez constante. Cette différence n'affecte aucunement cependant les résultats car la quantité finale chauffée est semblable.

Figure 9. Puissance soutirée par appareil en W par période de cinq minutes pour la journée 14/02 autour du pic optimisée selon le format de prix dual



Une concentration particulière sur la puissance soutirée par appareil permet de remarquer que le bénéfice est obtenu par un préchauffage de la maison avant le déclenchement de la sécheuse puis un chauffage minimal pour permettre le maintien de la température durant le cycle de séchage. Également le bénéfice est obtenu par le déclenchement du moins d'appareil possible lors du cycle de la sécheuse et d'un sous-chauffage encore plus important lorsqu'un appareil doit être déclenché pendant le cycle.

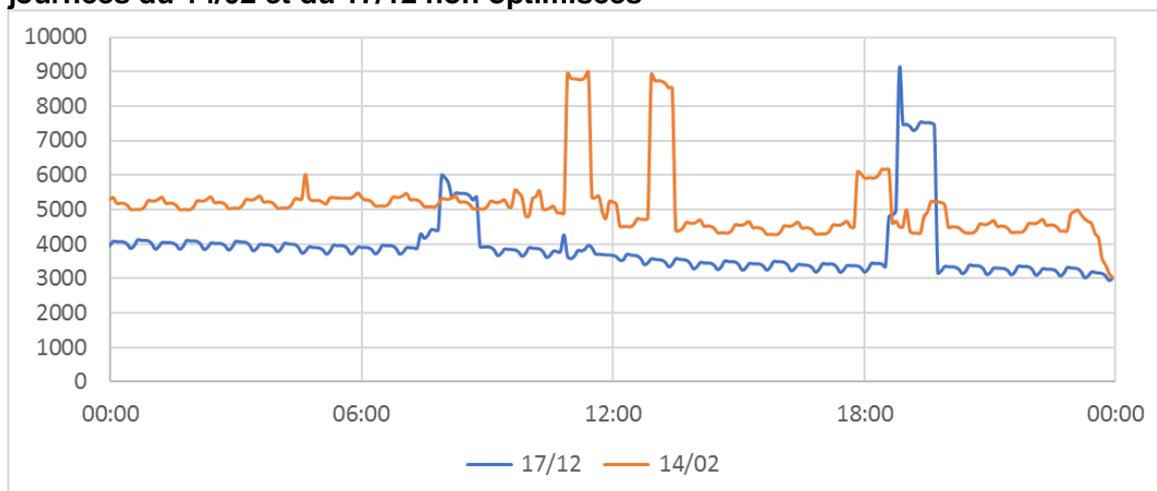
Cette observation montre que la combinaison du chauffage et de de la sécheuse dans la journée la plus froide de l'année risque très fortement de créer le pic de consommation. Cette observation entraîne la possibilité d'un traitement particulier pour les journées avec valeurs de températures extrêmes en déconseillant par exemple l'utilisation de sécheuse.

5.2.2.2 Journée B

Si les journées les plus froides sont traitées de façon particulière, il devient nécessaire d'évaluer les résultats atteignables sur les journées les plus froides non considérés comme particulières. C'est pour cela que la journée B du 17 décembre est considérée.

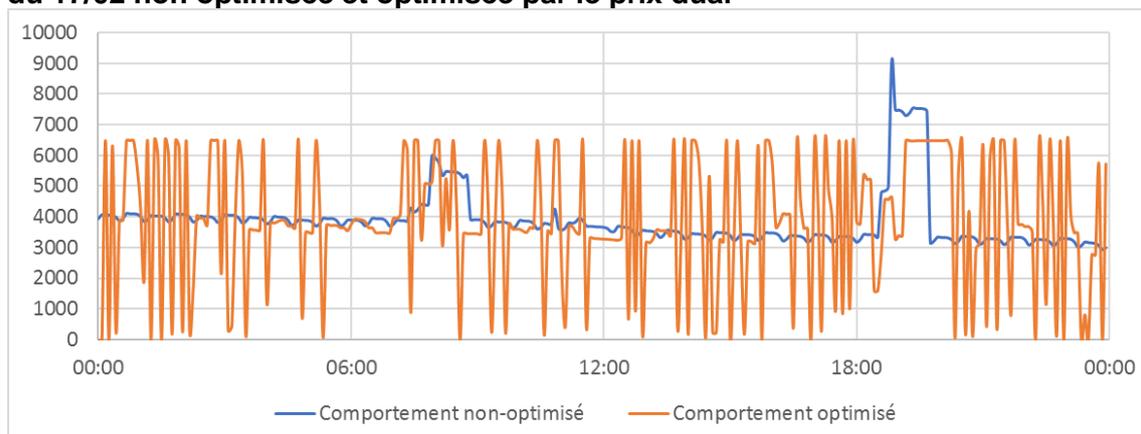
Une comparaison des 2 journées test montre comme attendu un comportement similaire avec des pics de consommation. Le niveau moyen est cependant plus bas pour la journée moins froide et les pics sont décalés dans le temps. Il est peut aussi être noté que malgré une température plus basse et donc un chauffage moins important, le pic atteint est très similaire et même supérieur. Le pic atteint pour la journée B du 17 décembre est de 9086,0 W contre 9007,3 pour le 14 février.

Figure 10. Puissance soutirée en W par période de cinq minutes pour les journées du 14/02 et du 17/12 non optimisées



Le comportement optimisé présente les mêmes caractéristiques que pour la première journée test. Il est observable sur la figure 11.

Figure 11. Puissance soutirée en W par période de cinq minutes pour la journée du 17/02 non optimisée et optimisée par le prix dual



De la même façon, le chauffage est moins régulier. L'important est la réduction du pic de consommation qui est clairement observable ici.

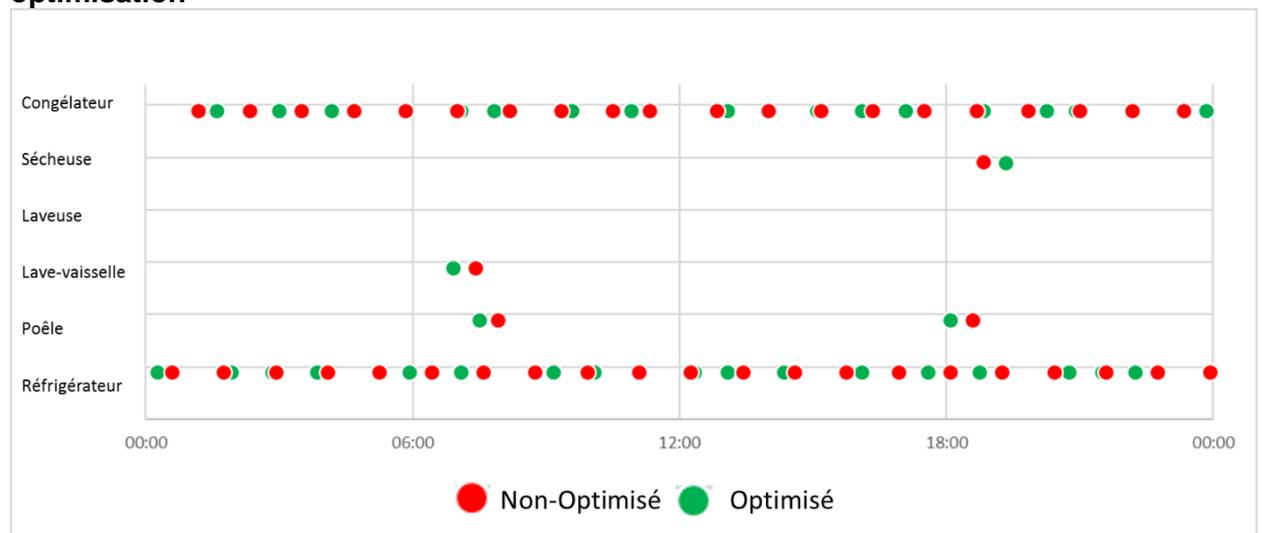
Tableau 13. Puissance maximale soutirée en W avec ou sans-optimisation pour les deux journées à l'étude et gains obtenus

	17/12	14/02
Pic non optimisé en W	9 086,0	9 007,3
Pic optimisé par prix dual en W	6 493,6	7 980,2
Amélioration en W	2 592,4	1 027,1
% d'amélioration	28,5 %	11,4 %

Le comportement optimisé incité par ce format de prix permet ici une réduction du pic de plus de 2500 W soit près de 30%. Il est à noter que ce chiffre est bien supérieur à la précédente journée testée qui était une journée extrême particulièrement froide.

Il est intéressant d'évaluer à quel point les déclenchements des appareils ont été déplacés dans le temps pour atteindre ce résultat. Ceci peut être observé sur la figure 12.

Figure 12. Déclenchement des appareils ménagers dans le temps avec ou sans optimisation



Dans la grande majorité des cas, les déclenchements ont bien été déplacés dans le temps. L'avancement ou le reculement temporel du déclenchement sont tous les deux utilisés par le modèle pour atteindre les économies.

Ces possibilités d'amélioration largement supérieures pour les journées avec des températures froides mais non extrêmes encouragent à traiter les journées extrêmes de façon particulière afin de compenser pour le grand besoin en chauffage et de rendre les journées comme celle du 17 décembre les journées avec le pic de consommation. À titre d'exemple si le 14/02 était traité de façon exceptionnelle et que le pic optimisé était inférieur à celui du 17/12. Alors le pic de consommation annuel pourrait hypothétiquement passer de 9007 W (pic à la plus froide journée non optimisé) à 6493 W (pic à la journée la plus froide non extrême optimisé).

5.2.3 Considération de la journée du 14 février sans sècheuse

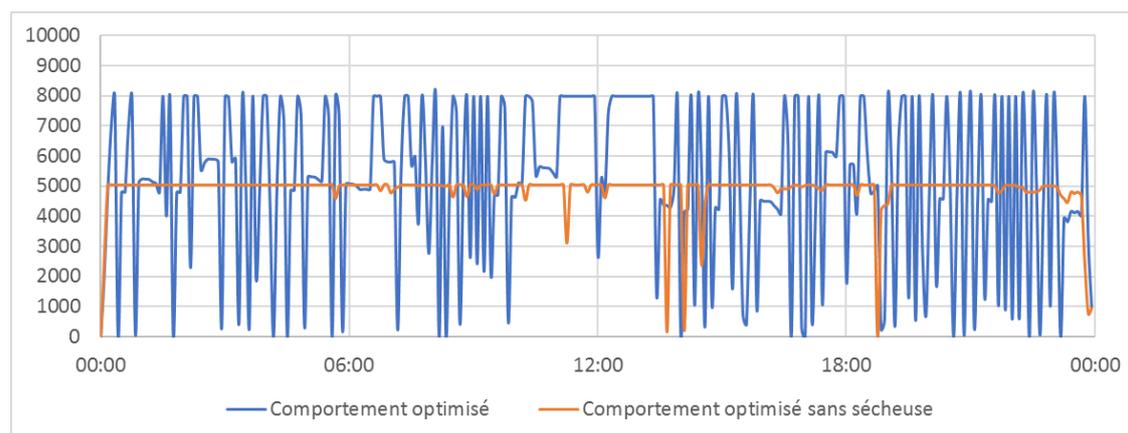
La section précédente conclut sur l'intérêt de traiter de façon particulière les journées avec des températures extrêmes pour bénéficier du potentiel d'amélioration plus important des journées à températures froides mais non extrêmes.

Comme mentionné précédemment, la pointe est atteinte en journée froide par le maintien minimum de la température et le cycle de séchage. Une piste pour un traitement particulier pas trop intrusif serait de considérer les journées à valeurs extrêmes sans l'utilisation de la sècheuse. Cette section vise donc à évaluer si ce traitement particulier serait adéquat et permettrait bien de rendre les journées extrêmes inférieures en puissance soutirée maximale aux journées non extrêmes avec sècheuse.

Premièrement concernant la gêne créée par ce traitement particulier, la non-utilisation de sècheuse électrique durant 3 jours de l'année semble acceptable. En effet l'appareil possède des substituts, peut être anticipé ou retardé contrairement au poêle par exemple. L'alternative de sous-chauffer durant ces journées pose elle bien des problèmes en termes de confort pour les utilisateurs.

Deuxièmement, afin de vérifier que ce traitement particulier est suffisant, la journée du 14/02 est de nouveau optimisée selon le prix dual mais sans demande pour la sècheuse.

Figure 13. Puissance soutirée en W par période de cinq minutes pour la journée du 14/02 optimisée avec ou sans sècheuse



La figure 13 confirme que sans la sècheuse, la puissance soutirée maximale est bien inférieure au scénario avec la sècheuse. La puissance soutirée maximale atteinte par un comportement optimisé est alors de 5050 W. Cette capacité est inférieure à la puissance soutirée maximale par le comportement optimisé d'une journée non

extrême. Ainsi le traitement particulier de ne pas utiliser la sècheuse en jour de grand froid permet de profiter du potentiel d'amélioration plus grand des journées non extrêmes et de réduire le pic de consommation annuel de plus de 9 kW à moins de 6,5 kW pour les données tests ici utilisées.

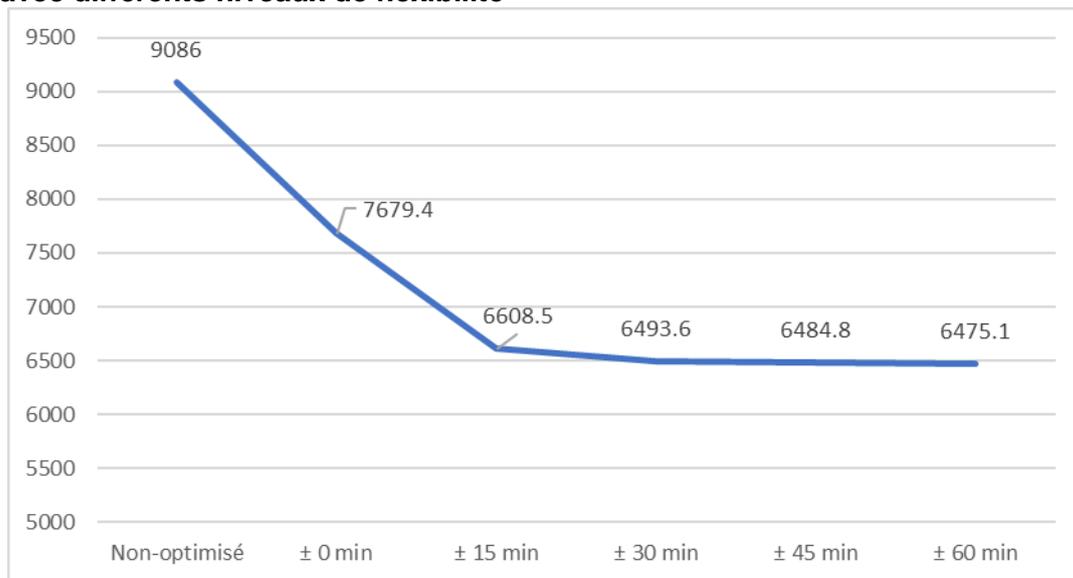
5.3 Étude de sensibilité sur divers paramètres

La pertinence de l'utilisation d'un prix dual pour inciter les comportements minimisant le pic de consommation a été démontrée. Également, les gains potentiels en termes de puissance soutirée ont été détaillés. Cette section vise à évaluer l'impact de diverses constantes du modèle sur les résultats précédemment obtenus. En particulier la section s'intéresse à l'impact de la variation du degré de liberté pour le déplacement des déclenchements, de la variation de l'intervalle de température acceptable, des capacités de chauffage et enfin des prix facturés pour la capacité et la consommation dans le format de prix dual. Pour cette section, la journée du 17/12 est considérée car si un traitement spécial est mis en place pour les journées extrêmes, le test 17/12 représente une journée type d'atteinte du pic de consommation annuel.

5.3.1 Impact de la flexibilité sur le déplacement temporel de l'allumage des appareils

Dans le modèle initial, une modification de l'heure de déclenchement des appareils dans un intervalle de plus ou moins 30 minutes autour de l'heure souhaitée est considéré acceptable. Cette section considère l'impact de modifier cette liberté de modification pour la rendre plus grande à plus ou moins 60 minutes, plus ou moins 45minutes, ou plus restrictive avec plus ou moins 15 minutes ou sans liberté. Les degrés de libertés sont alors respectivement 12 ; 9 ; 3 et 0. Il est à noter qu'utiliser le modèle sans modifier l'heure de déclenchement des appareils revient à utiliser un modèle n'optimisant que la gestion de la température.

Figure 14. Puissance maximale soutirée en W pour la journée du 17/22 optimisée avec différents niveaux de flexibilité



L'analyse de ces résultats permet plusieurs conclusions pertinentes. Tout d'abord, un modèle ne modifiant rien à l'utilisation des appareils ménagers et contrôlant seulement le chauffage permet d'obtenir une réduction du pic de plus de 1,4 kW. Cette amélioration est significative et elle est due à des changements qui n'impactent les utilisateurs que par la variation de la température intérieure entre 18°C et 24°C. Les utilisateurs ne sont aucunement impactés par des modifications de leur utilisation d'appareils ménagers.

Deuxièmement, le résultat du comportement optimisé avec un intervalle de variation du déclenchement de ± 15 minutes permet de nouveau la réduction de 1 kW, soit une nouvelle réduction significative. Ce résultat souligne l'intérêt de modifier, au moins légèrement les habitudes des consommateurs. La gestion du chauffage et le décalage du déclenchement des appareils de ± 15 minutes permettent donc sans trop modifier les habitudes des utilisateurs de réduire le pic de 2,4kW.

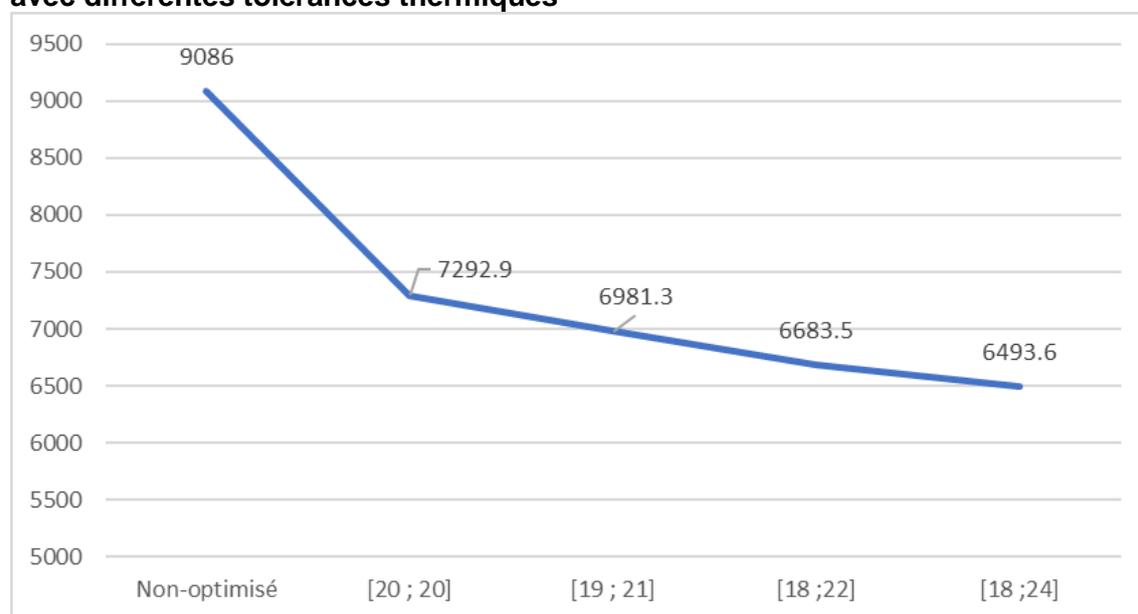
Finalement, les résultats des comportements optimisés avec des intervalles de variation du déclenchement moins restrictifs n'apportent que peu de bénéfice marginal. Par exemple, permettre de décaler le déclenchement de ± 30 minutes au lieu de ± 15 minutes ne réduit le pic que de 100 W additionnels. Cette observation suggère qu'un intervalle de ± 15 minutes est suffisant car il permet des résultats significatifs sans trop modifier les comportements. Également, cette observation permet de conclure que de très grandes économies sont atteignables sans trop modifier les habitudes des utilisateurs.

5.3.2 Impact de l'étendue possible des variations de températures

Dans le modèle initial, une variation de la température intérieure au domicile entre 18°C et 24°C est considérée acceptable. Cette section considère l'impact de modifier cet intervalle acceptable pour étudier les capacités utilisées maximales résultantes de scénarios où le confort thermique des utilisateurs est plus ou moins respecté. Les intervalles de températures intérieures [18 ; 22], [19 ; 21] et [20 ; 20] sont considérés. Il est à noter que l'intervalle [20 ; 20] équivaut à un modèle ne modifiant que les déclenchements des appareils.

Les résultats en termes de capacité utilisée maximale sont observables figure 15.

Figure 15. Puissance maximale soutirée en W pour la journée du 17/12 optimisée avec différentes tolérances thermiques



Les résultats permettent diverses observations intéressantes et sont assez similaires aux analyses de sensibilité sur la flexibilité du déclenchement des appareils. Aucune variation de la température intérieure et donc un modèle variant seulement le déclenchement des appareils permet une réduction de la pointe de capacité de 1,8 kW. Cette diminution est significative et est atteinte sans modifier le confort thermique des utilisateurs.

Les modèles permettant un contrôle de la température permettent d'atteindre de meilleurs résultats mais les capacités utilisées maximales atteintes ne sont pas significativement inférieures. Ainsi un élargissement de l'intervalle acceptable de 1°C dans chaque direction permet la baisse du pic d'environ 300 W. Cette observation

suggère que la mise en place d'un contrôle de la température n'est pas primordiale si un contrôle du déclenchement des appareils est en place.

Les conclusions similaires des deux études de sensibilités suggèrent que la mise en place d'un système ou les changements de comportements incités par un format de prix dual peuvent permettre d'atteindre des résultats significatifs en ne jouant que sur l'un des deux leviers, soit en déplaçant le déclenchement des appareils soit en faisant varier la température interne. L'association des deux leviers permet l'obtention d'économies supplémentaires mais l'utilisation d'un seul permet déjà de bons résultats.

5.3.3 Impact de l'augmentation des capacités de chauffage

La quantité de chauffage qui peut être ajoutée dans une maison en cinq minutes dépend du nombre et de la capacité de ses plinthes thermiques. Ainsi celle-ci est limitée dans le modèle à 666,7 Wh pour chaque période de cinq minutes. Cette quantité correspond à la quantité de chauffage possible avec 8 plinthes de 1000 W de capacité.

Il est possible qu'en augmentant cette capacité, un meilleur contrôle du chauffage soit possible et donc que de meilleurs résultats soient atteignables. Cependant une étude de la quantité de chauffage ajoutée à chaque période dans la solution optimale indique que cette contrainte n'est jamais active. Ainsi investir pour augmenter la capacité de chauffage n'aura aucun impact sur le pic de capacité utilisé.

5.3.4 Impact de la variation du tarif dual sur un comportement optimisé

Bien que le prix facturé pour la consommation et la capacité dans le format dual ne soit pas contraignant, il est intéressant d'évaluer l'impact de leur variation sur la solution. En effet, si la solution optimisée présente une puissance soutirée maximale différente d'une solution minimisant directement la puissance soutirée maximale, alors les prix associés à cette solution ne seront pas adaptés même si le format de prix dual est pertinent. Ceci pourrait apparaître si le prix chargé pour la puissance soutirée réduit trop ou le prix chargé pour la consommation augmente trop. Également, pour évaluer si l'incitatif financier est suffisant pour créer les comportements désirés, il est intéressant de comparer le prix facturé pour le comportement optimisé contre le comportement non optimisé.

Divers niveaux de prix consommation/capacité sont considérés et la puissance soutirée maximale est évalué pour chacun. Les prix sont en \$/kW/mois pour la capacité et \$/kWh pour la consommation.

Tableau 14. Puissance soutirée maximale optimisée et incitatif financier pour différents tarifs

Couple de prix Consommation/Capacité	Puissance soutirée en W	Coût total en \$	Coût total en \$ si non optimisé	Incitatif financier \$	Incitatif financier %
[0,0497 ; 14,43] (Initial)	6 493,6	7,71	8,98	1,27	14%
[0,0497 ; 7]	6 493,6	6,10	6,73	0,63	9,3%
[0,0497 ; 1]	6 493,6	5,67	6,12	0,45	7,4%
[0,0697 ; 14,43]	6 493,6	9,56	10,83	1,28	11,7%
[0,0897 ; 14,43]	6 493,6	11,41	12,69	1,28	10,1%
[0,1 ; 14,43]	6 493,6	12,36	13,64	1,28	9,3%

L'étude de la sensibilité des prix facturés permet de conclure que le comportement parfaitement optimisé minimisant le prix permet toujours d'atteindre la puissance soutirée maximale minimum.

Cependant, dans le cas où le prix est utilisé comme incitatif pour motiver les comportements souhaités, les différents prix entraînent une variation de l'incitatif financier. Il est impossible d'évaluer quel pourcentage d'économie est suffisant pour inciter le comportement, ce pourcentage varie également grandement d'un consommateur à un autre. Il est intéressant de noter que les prix initialement considérés permettent de créer un incitatif d'une réduction de 14% si le comportement idéal est adapté. Cet incitatif passe en-dessous de 10% si le prix facturé pour la capacité descend vers 7\$/kW/mois ou si le prix facturé pour la consommation augmente proche de 0,1\$/kWh.

À l'inverse, le prix de la capacité pourrait être augmenté ou le prix pour la consommation diminué afin d'augmenter l'incitatif pour créer les comportements adéquats. Une variation dans ce sens est sûr de conserver un comportement optimisé qui permet d'obtenir la puissance soutirée maximale au minimum. Cependant une augmentation de l'incitatif pourrait permettre une stimulation du comportement désiré plus forte et donc plus efficace.

6. Améliorations et études complémentaires possibles

L'étude présentée précédemment soulève des résultats très intéressants qui motivent la poursuite de la recherche dans cette direction. Cette étude offre une preuve de valeur et du potentiel gain de pointe par maison atteignable par l'utilisation de systèmes de contrôle externes ou par la mise en place d'un format de prix incitant des comportements particuliers. Cependant de nombreuses améliorations sont possibles. Concernant la précision du modèle, celui-ci vise à représenter adéquatement la réalité tout en gardant un aspect simple. Il serait donc possible de le complexifier pour avoir un modèle plus proche de la réalité. Pour cela, il serait possible de gérer différemment la température ou également d'utiliser des caractéristiques de maisons différentes. Une autre piste d'amélioration possible est de donner le contrôle à des appareils supplémentaires pour augmenter le gain potentiel. Finalement, afin d'être utilisé en tant que système de contrôle externe, l'algorithme devrait être rendu plus flexible, robuste et intégré.

6.1 Représentativité du modèle

6.1.1 Gestion de la température

Le modèle utilise des approximations de la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer une maison de 1°C et de la quantité d'énergie perdue pour chaque période en fonction de la température extérieure. Ces approximations ne prennent par exemple pas en compte la chaleur stockée dans les murs ou les objets de la maison ou la chaleur produite par les occupants et leurs activités. Ainsi ces approximations pourraient être raffinées par une étude thermique des bâtiments. Il est à noter que les résultats obtenus par cette étude ne seraient pas grandement modifiés, leur précision en serait simplement augmentée.

Le modèle ne considère pas l'occupation du ménage pour la gestion de la température. De nombreux modèles visant la minimisation de la consommation utilisent ce paramètre afin de sous-chauffer hors des périodes d'occupation. Cette prise en compte pourrait facilement être ajoutée au modèle en modifiant la contrainte de température moyenne et de température minimum durant les périodes non occupées. Cette intégration permettrait des gains potentiels supérieurs en termes de capacité car certains appareils pourraient être décalés durant ces périodes non occupées et également en termes de consommation.

6.1.2 Caractéristiques des maisons

Le modèle considère un type de maison particulier pour les tests. Le type de maison choisi est typique de la majorité des maisons canadiennes. Cependant, des tests sur différents types de maisons permettrait d'évaluer les résultats atteignables pour chaque type. Il serait donc pertinent d'évaluer les résultats en faisant varier la taille des maisons, la qualité de l'isolation des maisons et la quantité de démarrages d'appareils demandée. Une assomption est possible que plus les maisons tests sont grandes, consommatrices en appareils et faiblement isolés, plus le pic de consommation sera haut mais également plus les potentiels gains seront importants. Cette assomption pourrait être vérifié dans une étude subséquente et la qualité des résultats alors atteignables évaluée. Il est à noter que l'ensemble de données utilisé dans cette étude fournit des profils de consommation plus demandant en appareils pour des maisons plus grandes.

6.2 Ajouts d'appareils pertinents

Le modèle développé dans cette étude se concentre sur les appareils ayant une capacité connue et pouvant être déplacés sans trop affecter les activités des utilisateurs. Par exemple la télévision et la lumière ne sont pas considérés car leur déplacement serait source d'une importante gêne. Tout en gardant cette caractéristique, il serait possible de considérer certains appareils supplémentaires pour les inclure dans le modèle. Par exemple, le fer à repasser ou l'aspirateur pourraient être considérés. Dans les appareils de cuisine, le micro-onde, la bouilloire ou le grille-pain pourraient également être considérés. Certains de ces appareils ne peuvent être contrôlés automatiquement mais leur utilisation pourrait influencer le déclenchement des autres appareils. L'ajout de chaque appareil dans le modèle augmente le gain potentiel car il augmente le contrôle possible du modèle.

Dans la même idée, pour garder le modèle pertinent dans un avenir proche, celui-ci doit inclure la gestion du chargement des voitures électriques. En effet, les voitures électriques soutirent une très importante puissance lorsqu'elles se rechargent. Les bornes disponibles les moins puissantes ont une capacité de près de 2 kW. Les nombres de voitures électriques et de bornes sont en augmentation constante. Le chargement est idéal pour le modèle ici présenté car le moment de chargement n'impacte aucunement l'utilisateur tant que sa voiture est rechargée avant son départ, le lendemain matin par exemple. Il est donc nécessaire d'ajouter la gestion des voitures électriques pour garder ce genre de modèle pertinent dans le futur. Cet ajout

d'un appareil à haute capacité augmente de nouveau de façon significative l'intérêt et les gains potentiels du modèle.

7. Conclusion

Afin de limiter les investissements nécessaires dans le réseau électrique, il est nécessaire de contrôler le pic de demande électrique ou plutôt la capacité nécessaire du réseau. La capacité nécessaire et les coûts en investissement liés augmentent car les zones urbaines se densifient et les voitures électriques se répandent. Diverses actions sont possibles pour contrôler ce pic, l'une d'elle est le contrôle de la consommation par un contrôle externe ou par l'utilisation d'incitatifs financiers.

L'algorithme proposé ici permet d'évaluer que pour une maison unifamiliale classique, une diminution de la capacité nécessaire de plus d'un kW est possible par un contrôle externe ou un incitatif financier suffisant et approprié. Décaler l'utilisation de la sècheuse pourrait permettre une diminution de plus de 2 kW. Un format de prix facturant la capacité nécessaire de la maison et la consommation est testé comme adapté pour inciter le comportement désiré chez le consommateur. Le Québec contenant 1,6 millions de maisons unifamiliales, ce gain de 2 kW par maison suggère une diminution possible de la capacité nécessaire de l'ordre de grandeur de 3 millions kW ou 3 000 MW.

Cette valeur ne peut être utilisée comme une économie possible réaliste mais doit être considérée comme un ordre de grandeur permettant d'estimer les économies réalisables. En effet, les gains varient d'une maison à une autre. Également, cette étude considère une seule maison, une estimation plus précise des économies réalisables nécessite la considération de plusieurs maisons pour la même journée qui optimisent séparément leur comportement. Leur puissance soutirée agrégée permettrait alors une analyse plus réaliste que la puissance soutirée par une maison multipliée par le nombre de maisons. En effet, si deux maisons ne consomment pas à la même heure, alors l'économie agrégée sera plus faible. Également, des maisons consommant majoritairement dans des heures où la consommation provinciale est très faible ne permettront pas de réduire la pointe. Par exemple, un travailleur de nuit consommant majoritairement à 23h00 et à 04h00 ne participe pas à la pointe et ne permettra donc pas d'économie pour la pointe à l'échelle provinciale. Bien que ces cas existent, la majorité des utilisateurs présentent des comportements similaires avec des heures où la consommation est élevée.

L'utilisation des résultats de cette étude pour obtenir un ordre de grandeur des économies possibles reste donc pertinente.

Comme présenté en introduction, Hydro-Québec évalue que chaque kW économisé évite un investissement de 20\$ par an, jusqu'en 2023 puis 110\$ par an après cette date. Cette économie de 2 kW, si obtenue dans chaque maison unifamiliale permettrait donc une économie de 60 millions de dollars canadiens simplement pour 2018. Cette étude montre également que des économies significatives sont réalisables par le contrôle du chauffage seulement, ce qui simplifie la potentielle adoption de systèmes de contrôle externes ou le potentiel changement de comportement.

Ces résultats encouragent la poursuite de recherches dans les systèmes de contrôle externes et la réflexion sur la mise en place de nouveaux formats de prix adaptés pour inciter les comportements souhaités chez les consommateurs. Chaque économie supplémentaire pour un ménage ou chaque nouveau ménage présentant le comportement désiré participe au contrôle de la capacité nécessaire et donc à la limite des investissements nécessaires dans le réseau électrique.

8. Bibliographie

- Agnetis, A., de Pascale, G., Detti, P., & Vicino, A. (2013). Load scheduling for household energy consumption optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(4), 2364-2373.
- Armstrong, M. M., Swinton, M. C., Ribberink, H., Beausoleil-Morrison, I., & Millette, J. (2009). Synthetically derived profiles for representing occupant-driven electric loads in Canadian housing. *Journal of Building Performance Simulation*, 2(1), 15-30.
- Beaudin, M., & Zareipour, H. (2015). Home energy management systems: A review of modelling and complexity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 318-335.
- Bose, A. (2010). Smart transmission grid applications and their supporting infrastructure. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1(1), 11-19.
- Chen, C., Wang, J., & Kishore, S. (2014). A distributed direct load control approach for large-scale residential demand response. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(5), 2219-2228.
- Chen, Z., Wu, L., & Fu, Y. (2012). Real-time price-based demand response management for residential appliances via stochastic optimization and robust optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1822-1831.
- Di Santo, K. G., Kanashiro, E., Di Santo, S. G., & Saidel, M. A. (2015). A review on smart grids and experiences in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1072-1082.
- Hassan, N. U., Pasha, M. A., Yuen, C., Huang, S., & Wang, X. (2013). Impact of scheduling flexibility on demand profile flatness and user inconvenience in residential smart grid system. *Energies*, 6(12), 6608-6635.
- Jia, D., Meng, X., & Song, X. (2011). Study on technology system of self-healing control in smart distribution grid. In *Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, 1, 26-30. IEEE.
- Johnson, G., & Beausoleil-Morrison, I. (2017). Electrical-end-use data from 23 houses sampled each minute for simulating micro-generation systems. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1449-1456.

- Kim, B. G., Zhang, Y., van der Schaar, M., & Lee, J. W. (2014). Dynamic pricing for smart grid with reinforcement learning. In *Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs)*, 2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops, 640-645. IEEE.
- Lui, T. J., Stirling, W., & Marcy, H. O. (2010). Get smart. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8(3), 66-78.
- Matallanas, E., Castillo-Cagigal, M., Gutiérrez, A., Monasterio-Huelin, F., Caamaño-Martín, E., Masa, D., & Jiménez-Leube, J. (2012). Neural network controller for active demand-side management with PV energy in the residential sector. *Applied Energy*, 91(1), 90-97.
- Mets, K., Verschueren, T., De Turck, F., & Devellder, C. (2011). Exploiting V2G to optimize residential energy consumption with electrical vehicle (dis) charging. In *Smart Grid Modeling and Simulation (SGMS)*, 2011 IEEE First International Workshop on Smart Grid Modeling and Simulation 7-12. IEEE.
- Molderink, A., Bakker, V., Bosman, M. G., Hurink, J. L., & Smit, G. J. (2009). Domestic energy management methodology for optimizing efficiency in smart grids. In *PowerTech*, 2009 IEEE Bucharest (pp. 1-7). IEEE.
- Olatomiwa, L., Mekhilef, S., Ismail, M. S., & Moghavvemi, M. (2016). Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 821-835.
- Rowlands, I. H., Reid, T., & Parker, P. (2015). Research with disaggregated electricity end-use data in households: review and recommendations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 4(5), 383-396.
- Saldanha, N., & Beausoleil-Morrison, I. (2012). Measured end-use electric load profiles for 12 Canadian houses at high temporal resolution. *Energy and Buildings*, 49, 519-530.
- Salinas, S., Li, M., & Li, P. (2013). Multi-objective optimal energy consumption scheduling in smart grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(1), 341-348.
- Siano, P. (2014). Demand response and smart grids—A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 461-478.
- Sou, K. C., Weimer, J., Sandberg, H., & Johansson, K. H. (2011). Scheduling smart home appliances using mixed integer linear programming. In *Decision and*

Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 5144-5149. IEEE.

Tiptipakorn, S., & Lee, W. J. (2007). A residential consumer-centered load control strategy in real-time electricity pricing environment. In Power Symposium, 2007. NAPS'07. 39th North American Power Symposium, 505-510. IEEE.

Yu, Z., Jia, L., Murphy-Hoye, M. C., Pratt, A., & Tong, L. (2013). Modeling and stochastic control for home energy management. IEEE Transactions on Smart Grid, 4(4), 2244-2255.

Zimmermann, J. P. (2009). End-use metering campaign in 400 households in sweden assessment of the potential electricity savings. Contract, 17, 05-2743.

9. Annexes

9.1 Code OPL

```
/*******  
/** OPL 12.6.3.0 Model  
/** Authors: Julien Robert  
/** Creation Date: 2017-09-13 at 11:09  
/*******/  
// Modèle OPL - Mémoire  
// *****  
// Paramètres et ensembles  
// *****  
// Période de 5 minutes dans une journée  
int T1 = 288 ;  
  
range T = 1..T1 ;  
  
// Type d'appareil différent  
range I = 1..6;  
  
// Demande d'utilisation de l'appareil i au temps t  
int D[I][T] = ... ;  
  
// Matrice de consommation de l'appareil i lancé au temps t  
int nbProd = ...;  
int nbTemps1 = ...;  
  
float nb1[1..nbProd*nbTemps1*nbTemps1] = ...;  
float C[i in 1..nbProd, t in 1..nbTemps1, u in 1..nbTemps1] =  
nb1[u+nbTemps1*(t-1)+nbTemps1*nbTemps1*(i-1)];  
  
// Temperature exterieure  
float E[T] = ... ;  
  
// Prix variable  
float p[T] = ... ;  
  
// Prix fixe  
float pf1 = 0.0582 ;  
float pf2 = 0.0892 ;  
  
// Pricing dual capacité/energie  
float pc = 14.43 ;  
float pfc = 0.0497 ;  
  
// Degré de liberté  
int L = 6 ;  
  
range N = -L..L ;  
  
// *****  
// Variables de décision  
// *****  
// Variable qui détermine si appareil i est lancé au temps t  
dvar boolean x [I,T];
```

```
//Variable artificielle du min max
dvar float z ;

// Quantite chauffee au temps T
dvar float y[T] ;

// Temperature interieure
dvar float j[T] ;

dvar float res[T] ;

dvar float conso [T] ;

dvar float consoi [I,T] ;

// *****
// Fonction objectif
// *****

// Fonction objectif pour la minimisation du cout en prix constant
// minimize (sum (t in T) sum(i in I) sum(u in T)
x[i][t]*C[i][t][u]/12 + sum (t in T)y[t])*pf2/1000
// - min1((sum (t in T) sum(i in I) sum(u in T)
x[i][t]*C[i][t][u]/12 + sum (t in T)y[t]),33)*(pf2-pf1);

// Fonction objectif pour la minimisation du cout time of use
// minimize sum (t in T) sum(i in I) sum(u in T)
x[i][t]*C[i][t][u]*p[u]/1000/12 + sum (t in T)y[t]*p[t]/1000;

// Fonction objectif pour la minimisation du pic
minimize sum (t in T) sum(i in I) sum(u in T)
x[i][t]*C[i][t][u]*pfc/1000/12 + sum (t in T)y[t]*pfc/1000 +
z*pfc/1000/30 ;

// minimize z ;
// *****
// Contraintes
// *****
subject to{

// Contrainte du min-max
forall(u in T)
sum(i in I) sum(t in T) x[i][t]*C[i][t][u] + y[u]*12 <= z ;

forall (u in T)
res[u] == sum(i in I) sum(t in T) x[i][t]*C[i][t][u] +
y[u]*12 ;

forall (u in T)
conso[u] == sum(i in I) sum(t in T) x[i][t]*C[i][t][u]/12
+ y[u] ;

forall (i in I) forall (u in T)
consoi[i][u] == sum (t in T) x[i][t]*C[i][t][u]/12 ;

// Degrés de liberté
forall (i in I) forall (t in 7..282)
// x[i][t] == D[i][t] ;
```

```
(x[i][t-3] +x[i][t-2] + x[i][t-1] + x[i][t] +x[i][t+1]
+x[i][t+2] +x[i][t+3]
+ x[i][t-6] +x[i][t-5] + x[i][t-4] +x[i][t+6]
+x[i][t+5] +x[i][t+4] ) *D[i][t]
>=
( D[i][t-3] +D[i][t-2] + D[i][t-1] + D[i][t]
+D[i][t+1] +D[i][t+2] +D[i][t+3]
+ D[i][t-6] +D[i][t-5] + D[i][t-4] +D[i][t+6] +D[i][t+5]
+D[i][t+4]) *D[i][t] ;

// Autant de démarrage que demandé
forall (i in I)
sum (t in T)x[i][t] == sum (t in T)D[i][t];

// Pas de démarrage avant la fin du précédent
forall (t in 1..T1-6)
sum(n in 0..5) x[1][t+n] <= 1 ;
forall (t in 1..T1-9)
sum(n in 0..8) x[2][t+n] <= 1 ;
forall (t in 1..T1-9)
sum(n in 0..8) x[3][t+n] <= 1 ;
forall (t in 1..T1-7)
sum(n in 0..6) x[4][t+n] <= 1 ;
forall (t in 1..T1-10)
sum(n in 0..9) x[5][t+n] <= 1 ;
forall (t in 1..T1-6)
sum(n in 0..5) x[6][t+n] <= 1 ;

// Température interieure se déprécie et doit rester
supérieure a 20Celsius
forall (t in 2..T1)
j[t] == j[t-1] + y[t] - 9*(max1(0 , j[t-1]/123 - E[t-1])) ;

forall (t in T)
j[t] >= 123*18 ;

forall (t in T)
j[t] <= 123*24 ;

j[1] == 123*20 ;

sum (t in T) j[t]/T1 >= 20*123 ;

forall (t in T)
y[t] <= 10*1000/12 ;

// Ajout de température toujours positif
forall (t in T)
y[t]>= 0 ;
```

```
/******  
* OPL 12.6.3.0 Data  
* Authors : Julien Robert  
* Creation Date: 2016-01-31 at 19:27:52  
*****/  
SheetConnection  
sheetInput("C:\\Users\\Julien\\Desktop\\ElecData\\Final\\dataop15.xls  
x");  
  
D from SheetRead(sheetInput,"d1!C2:H289");  
  
nbProd = 6;  
nbTemps1 = 288;  
  
nb1 from SheetRead(sheetInput,"Matriceconso!A1:A497664");  
  
E from SheetRead(sheetInput,"d1!I2:I289") ;  
  
p from SheetRead(sheetInput,"d1!J2:J289") ;  
  
conso1 to SheetWrite(sheetInput,"o2!B1:KC6");  
  
y to SheetWrite(sheetInput,"o2!B7:KC7") ;  
res to SheetWrite(sheetInput,"o2!B8:KC8") ;  
  
conso to SheetWrite(sheetInput,"o2!B9:KC9")
```

9.2 Matrice des articles recensés selon les choix d'objectifs, appareils, algorithmes et temps

Différents objectifs considérés									Appareils considérés (seulement plus de 5 recensements)														
Articles	Coût	Profil de consommation	Bien-être	Coût et bien-être	Coût et profil de consommation	Profil de Consommation et bien-être	Coût, profil de consommation, émission	Coût, profil de consommation, émission, bien-être	Chauffage	Chauffe-eau	Air-conditionné	Réfrigérateur	Batterie	Véhicule électrique	Laveuse	Lave-vaisselle	Système de production	Sècheuse	Lumières	Congélateur	Poêle et four	Télévision	Pompe de piscine
Nombre d'articles	16	9	2	34	1	1	1	1	21	21	20	17	16	16	15	12	12	10	10	10	10	7	6
1																							
2																							
3																							
4																							
5																							
6																							
7																							
8																							
9				x					x	x				x			x						x
10																							
11																							
12																							
13																							
14				x					x	x				x			x						x
15		x													x	x		x					
16						x			x	x	x	x	x		x	x	x	x	x		x		x
17				x																			
18					x								x										
19	x												x										
20	x												x				x						
21				x					x							x							
22				x					x		x												
23				x					x														
24				x					x								x						
25	x																						
26	x																						
27		x																					
28	x																						
29				x																			
30									x	x	x												
31				x																			
32				x									x										
33				x																			
34				x					x														
35	x													x			x						

Différents objectifs considérés									Appareils considérés (seulement plus de 5 recensements)														
Articles	Coût	Profil de consommation	Bien-être	Coût et bien-être	Coût et profil de consommation	Profil de Consommation et bien-être	Coût, profil de consommation, émission	Coût, profil de consommation, émission, bien-être	Chauffage	Chauffe-eau	Air-conditionné	Réfrigérateur	Batterie	Véhicule électrique	Laveuse	Lave-vaisselle	Système de production	Sècheuse	Lumières	Congélateur	Poêle et four	Télévision	Pompe de piscine
36				x					x														
37			x						x		x												
38		x												x									
39				x					x		x												
40				x									x	x									
41	x									x	x	x		x	x	x			x		x	x	
42	x																						
43								x															
44																							
45																							
46																							
47				x						x		x									x		
48				x						x		x									x		
49				x						x		x									x		
50				x																			
51																							
52		x									x		x							x			x
53		x																					
54				x					x	x				x			x						x
55																							
56																							
57	x								x	x	x	x	x	x	x	x		x					
58				x																			
59	x																						
60				x							x												
61				x							x	x		x	x	x					x	x	
62			x						x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x
63	x								x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x
64																							
65				x						x	x			x	x	x		x			x		
66				x																			
67				x							x		x	x	x					x			
68												x			x	x		x	x	x	x	x	
69				x					x	x			x				x						x
70				x					x	x				x			x						x
71	x													x									
72												x									x		
73				x					x	x	x												
74	x								x			x			x		x						
75		x																					

Différents objectifs considérés									Appareils considérés (seulement plus de 5 recensements)																
Articles	Coût	Profil de consommation	Bien-être	Coût et bien-être	Coût et profil de consommation	Profil de Consommation et bien-être	Coût, profil de consommation, émission	Coût, profil de consommation, bien-être	Chauffage	Chauffe-eau	Air-conditionné	Réfrigérateur	Batterie	Véhicule électrique	Laveuse	Lave-vaisselle	Système de production	Sècheuse	Lumières	Congélateur	Poêle et four	Télévision	Pompe de piscine		
76																									
77																									
78																									
79																									
80																									
81																									
82																									
83																									
84																									
85																									
86																									
87																									
88																									
89																									
90				x					x	x		x			x	x		x	x	x	x				
91		x							x	x		x		x	x	x				x	x				
92	x									x		x			x					x		x	x		
93						x				x	x			x				x							
94	x									x															
95		x									x														
96																									
97				x									x								x				
98		x											x												
99																									
100				x																					
101																									
102																									
103																									
104	x																								
105				x																					
106				x																					

Méthodes d'optimisation utilisées									Pas de temps choisis					
Articles	Programmation linéaire	Programmation quadratique	Programmation convexe	Programmation dynamique	Programmation linéaire mixte avec variables entières	Programmation non-linéaire mixte avec variables entières	Métaheuristiques	Heuristiques	1 heure	30 minutes et 20 minutes	Entre 10 et 15 minutes	Entre 6 et 10 minutes	5 minutes	1 minute
Nombre d'articles	12	6	2	3	20	1	10	19	37	3	10	2	2	2
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9							x		x					
10														
11									x					
12	x													
13														
14					x					x				
15								x	x					
16					x						x			
17	x								x					
18					x							x		
19					x							x		
20	x								x					
21				x	x			x						
22					x			x			x			
23									x					
24					x				x					
25	x								x					
26			x						x					
27					x									
28	x								x					
29							x		x					
30														
31		x							x					
32			x								x			
33							x				x			
34	x								x					
35					x				x					

Méthodes d'optimisation utilisées									Pas de temps choisis					
Articles	Programmation linéaire	Programmation quadratique	Programmation convexe	Programmation dynamique	Programmation linéaire mixte avec variables entières	Programmation non-linéaire mixte avec variables entières	Métaheuristiques	Heuristiques	1 heure	30 minutes et 20 minutes	Entre 10 et 15 minutes	Entre 6 et 10 minutes	5 minutes	1 minute
36							x					x		
37	x													
38		x												
39		x												x
40		x			x									x
41								x						
42									x					
43								x	x					
44										x				
45								x						
46														
47								x						
48								x						
49								x						
50														
51														
52	x								x					
53								x		x				
54					x									
55					x									
56														
57									x					
58									x					
59				x					x		x			
60							x							
61					x				x					
62	x								x					
63	x								x					
64														
65					x								x	
66	x			x									x	
67		x							x					
68								x						
69							x		x					
70							x		x					
71								x	x					
72								x						
73	x							x			x			

Articles	Méthodes d'optimisation utilisées								Pas de temps choisis					
	Programmation linéaire	Programmation quadratique	Programmation convexe	Programmation dynamique	Programmation linéaire mixte avec variables entières	Programmation non-linéaire mixte avec variables entières	Métaheuristiques	Heuristiques	1 heure	30 minutes et 20 minutes	Entre 10 et 15 minutes	Entre 6 et 10 minutes	5 minutes	1 minute
74					x						x			
75					x						x			
76														
77														
78														
79														
80														
81														
82														
83														
84														
85														
86														
87														
88														
89														
90								x	x					
91					x					x				
92						x			x					
93					x			x	x					
94								x						
95							x					x		
96								x						
97		x							x					
98												x		
99									x					
100					x							x		
101														
102														
103														
104											x			
105							x							
106					x									

Articles et numéros associés utilisés dans la matrice

[1] Bhattacharya K, Bollen M, Daalder J. Operation of restructured power systems. Springer; 2001.

[2] AESO. Aeso long-term transmission system plan. Technical report. Alberta Electric System Operator; 2009.

[3] Ipakchi A, Albuyeh F. Grid of the future. IEEE Power Energy Mag 2009; 7 (March (2)): 52–62.
<http://dx.doi.org/10.1109/MPE.2008.931384> ISSN 1540-7977.

[4] Lui T, Stirling W, Marcy H. Get smart. IEEE Power Energy Mag 2010; 8 (May (3)): 66–78.
<http://dx.doi.org/10.1109/MPE.2010.936353> ISSN 1540-7977.

[5] Albadi M, El-Saadany E. A summary of demand response in electricity markets. Electr Power Syst Res 2008; 78(11):1989–96.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2008.04.002> ISSN 0378-7796.

[6] Wilkenfeld G. Demand response: a national strategy to address air conditioner peak load. Sydney: Equipment Energy Efficiency Committee (E3); 2006.50pp.

[7] Borenstein S, Jaske M, Rosenfeld A. Dynamic pricing, advanced metering and demand response in electricity markets. Technical report. University of California; October 2002.

[8] Faruqi A, Sergici S. Household response to dynamic pricing of electricity: a survey of seventeen pricing experiments. 2007; 20(8):68–77,
http://www.nwcouncil.org/media/4618/Faruqi_The_Power_of_Experimentation__11_13_08_.pdf.

[9] Pedrasa M, Spooner T, MacGill I. The value of accurate forecasts and a probabilistic method for robust scheduling of residential distributed energy resources. In: PMAPS 2010; 2010.

[10] Pedrasa M, Spooner T, MacGill I. An energy service decision-support tool for optimal energy services acquisition. Technical report. University of New South Wales; April 2010.

[11] S. Holland, E. Mansur. Is real time pricing green? the environmental impacts of electricity demand variance. Rev Econ Stat, 90 (3) (2008), pp. 550-561

[12] A. Mohsenian-Rad, A. Leon-Garcia Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments

IEEE Trans Smart Grid, September (1) (2) (2010), pp. 120-133, 10.1109/TSG.2010.2055903 ISSN 1949-3053

[13] Haukeli Ingrid Endresen. Smart grid-the effect of increased demand elasticity at the system level [Master's thesis]. Norwegian School of Science and Technology; July 2011.

[14] Beaudin M, Zareipour H, Schellenberg A. Residential energy management using a moving window algorithm. In: Innovative smart grid technologies (ISGT), 2012; 2012.

[15] E. Matallanas, M. Castillo-Cagigal, A. Gutierrez, F. Monasterio-Huelin, E. Caamano-Martin, D. Masa, et al. Neural network controller for active demand-side management with {PV} energy in the residential sector Appl Energy, 91 (1) (2012), pp. 90-97, 10.1016/j.apenergy.2011.09.004 ISSN 0306-2619

[16] M.C. Bozchalui, S.A. Hashmi, H. Hassen, C.A. Canizares, K. Bhattacharya Optimal operation of residential energy hubs in smart grids IEEE Trans Smart Grid, 3 (December (4)) (2012), pp. 1755-1766, 10.1109/TSG.2012.2212032 ISSN 1949-3053

[17] Ilic M, Black J, Watz J. Potential benefits of implementing load control. In: Power engineering society winter meeting, 2002. New York: IEEE, vol. 1; 2002. p. 177-82. <http://proxy2.hec.ca:2098/10.1109/PESW.2002.984981>.

[18] Molderink A, Bakker V, Bosman M, Hurink J, Smit J. Domestic energy management methodology for optimizing efficiency in smart grids. In: IEEE conference on power technology; 2009.

[19] A. Molderink, V. Bakker, M. Bosman, J. Hurink, G. Smit Management and control of domestic smart grid technology

IEEE Trans Smart Grid, 1 (September (2)) (2010), pp. 109-119, 10.1109/TSG.2010.2055904 ISSN 1949-3053

[20] C. Clastres, T. Pham, F. Wurtz, S. Bacha Ancillary services and optimal household energy management with photovoltaic production Energy, 35 (1) (2010), pp. 55-64, 10.1016/j.energy.2009.08.025 ISSN 0360-5442

[21] G.T. Costanzo, M.F. Guchuan Zhu, Anjos, G. Savard A system architecture for autonomous demand side load management in smart buildings IEEE Trans Smart Grid, 3 (4) (2012), pp. 2157-2165, 10.1109/TSG.2012.2217358 ISSN 1949-3053

[22] A. Agnetis, G. de Pascale, P. Detti, A. Vicino Load scheduling for household energy consumption optimization IEEE Trans Smart Grid, 4 (December (4)) (2013), pp. 2364-2373, 10.1109/TSG.2013.2254506 ISSN 1949-3053

[23] D. Livengood, R. Larson The energy box: locally automated optimal control of residential electricity usage Serv Sci, 1 (1) (2009), pp. 1-16, 10.1287/serv.1.1.1

[24] P. Samadi, H. Mohsenian-Rad, V.W.S. Wong, R. Schober Tackling the load uncertainty challenges for energy consumption scheduling in smart grid IEEE Trans Smart Grid, 4 (June (2)) (2013) pp. 1007-1016, 10.1109/TSG.2012.2234769 ISSN 1949-3053

[25] A. Mohsenian-Rad, V. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, A. Leon-Garcia Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid IEEE Trans Smart Grid, 1 (December (3)) (2010), pp. 320-331, 10.1109/TSG.2010.2089069 ISSN 1949-3053

[26] Mohsenian-Rad A, Wong V, Jatskevich J, Schober R. Optimal and autonomous incentive-based energy consumption scheduling algorithm for smart grid. In: Innovative smart grid technologies (ISGT), 2010; January 2010. p. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/ISGT.2010.5434752>.

[27] Chen C, Wang J, Kishore S. A distributed direct load control approach for large-scale residential demand response; 2014. ISSN 0885-8950.

[28] A.J. Conejo, J.M. Morales, L. Baringo Real-time demand response model IEEE Trans Smart Grid, 1 (December (3)) (2010), pp. 236-242, 10.1109/TSG.2010.2078843 ISSN 1949-3053

[29] Juan M. Lujano-Rojas, Claudio Monteiro, Rodolfo Dufo-Lopez, Jose L. Bernal-Agustin Optimum residential load management strategy for real time pricing (RTP) demand response programs Energy Policy, 45 (2012), pp. 671-679, 10.1016/j.enpol.2012.03.019 ISSN 0301-4215

[30] Navid-Azarbaijani N. Load model and control of residential appliances [Ph.D. thesis]. McGill University; August 1995.

[31] Tarasak P. Optimal real-time pricing under load uncertainty based on utility maximization for smart grid. In: 2011 IEEE international conference on smart grid communications (SmartGridComm); October 2011. p. 321–6. <http://dx.doi.org/10.1109/SmartGridComm.2011.6102341>.

[32] K.M. Tsui, S.C. Chan Demand response optimization for smart home scheduling under real-time pricing IEEE Trans Smart Grid, 3 (December (4)) (2012), pp. 1812-1821, 10.1109/TSG.2012.2218835 ISSN 1949-3053

[33] Zhao Zhuang, Lee Won Cheol, Shin Yoan, Song Kyung-Bin An optimal power scheduling method applied in home energy management system based on demand response ETRI J, 35 (December (4)) (2013), pp. 677-686 ISSN 12256463

[34] P. Constantopoulos, F. Scheweppe, R. Larson ESTIA: a real-time consumer control scheme for space conditioning usage under spot electricity pricing Comput Oper Res, 18 (8) (1991), pp. 751-765

[35] T. Pham, C. Clastres, F. Wurtz, S. Bacha, E. Zamai Optimal household energy management and economic analysis: from sizing to operation scheduling Adv Appl Mech Eng Technol (2008), 10.1109/TSG.2014.2310395

[36] Ha D, Ploix S, Zamai E, Jacomino M. Tabu search for the optimization of household energy consumption. In: IEEE international conference on information reuse and integration, 2006; 2006. p. 86–92. <http://dx.doi.org/10.1109/IRI.2006.252393>.

[37] Ha D, de Lamotte F, Huynh Q. Real-time dynamic multilevel optimization for demand-side load management. In: 2007 IEEE international conference on industrial engineering and engineering management; December 2007. p. 945–9. <http://dx.doi.org/10.1109/IEEM.2007.4419331>.

[38] Mets K, Verschueren T, De Turck F, Develder C. Exploiting v2g to optimize residential energy consumption with electrical vehicle (dis)charging. In: 2011 IEEE first international workshop on smart grid modeling and simulation (SGMS); October 2011. p. 7–12. <http://dx.doi.org/10.1109/SGMS.2011.6089203>.

[39] Jia Liyan, Yu Zhe, Murphy-Hoye MC, Pratt A, Piccioli EG, Tong Lang. Multi-scale stochastic optimization for home energy management. In: 2011 4th IEEE international workshop on computational advances in multi-sensor adaptive processing (CAMSAP); 2011. p. 113–6. <http://dx.doi.org/10.1109/CAMSAP.2011.6135900>.

[40] Zhe Yu, Liyan Jia, M.C. Murphy-Hoye, A. Pratt, E.G. Piccioli, Lang Tong Modeling and stochastic control for home energy management IEEE Trans Smart Grid, 4 (December (4)) (2013), pp. 2244-2255, 10.1109/TSG.2013.2279171 ISSN 1949-3053

[41] Boynuegri AR, Yagcitekin B, Baysal M, Karakas A, Uzunoglu M. Energy management algorithm for smart home with renewable energy sources. In: 2013 Fourth international conference on Power engineering, energy and electrical drives (POWERENG); May 2013. p. 1753–8. <http://dx.doi.org/10.1109/PowerEng.2013.6635883>.

[42] S. Kahrobaee, S. Asgarpoor, Wei Qiao Optimum sizing of distributed generation and storage capacity in smart households IEEE Trans Smart Grid, 4 (December (4)) (2013), pp. 1791-1801, 10.1109/TSG.2013.2278783 ISSN 1949-3053

[43] O. Sianaki, M. Masoum A multi-agent intelligent decision making support system for home energy management in smart grid: a fuzzy topsis approach Multiagent Grid Syst, 9 (January (3)) (2013), pp. 181-195

[44] Yang Hong-Tzer, Liao Jian-Tang, Lin Che-I. A load forecasting method for hems applications. In: PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble; June 2013. p. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/PTC.2013.6652195>.

[45] Misra S, Mondal A, Banik S, Khatua M, Bera S, Obaidat MS. Residential energy management in smart grid: a Markov decision process-based approach. In: Green computing and communications (GreenCom). 2013 IEEE and internet of things (iThings/CPSCoM). IEEE international conference on and IEEE cyber, physical and social computing; August 2013. p. 1152–7. <http://dx.doi.org/10.1109/GreenCom-iThings-CPSCoM.2013.200>.

[46] Rossello-Busquet A, Soler J, Dittmann L. A novel home energy management system architecture. In: 2011 Uksim 13th international conference on computer modelling and simulation (UKSim); March 2011. p. 387–92. <http://dx.doi.org/10.1109/UKSIM.2011.80>.

[47] Koch S, Zima M, Andersson G. Potentials and applications of coordinated groups of thermal household appliances for power system control purposes. In: 2009 IEEE PES/IAS conference on sustainable alternative energy (SAE); September 2009. p. 1–8. <http://dx.doi.org/10.1109/SAE.2009.5534841>.

[48] Koch S, Meier D, Zima M, Wiederkehr M, Andersson G. An active coordination approach for thermal household appliances; local communication and calculation tasks in the household. In: 2009 IEEE Bucharest PowerTech; July 2009. p. 1–8. <http://dx.doi.org/10.1109/PTC.2009.5281787>.

[49] Koch S, Zima M, Andersson G. Active coordination of thermal household appliances for load management purposes. In: IFAC symposium on power plants and power systems control, Tampere, Finland, Citeseer; 2009.

[50] S. Das, D. Cook, A. Battacharya, E. Heierman, T. Lin The role of prediction algorithms in the mavhome smart home architecture

IEEE Wirel Commun, 9 (December (6)) (2002), pp. 77-84,
10.1109/MWC.2002.1160085 ISSN 1536-1284

[51] Cook D, Youngblood M, Heierman E, Gopalratnam K, Rao S, Litvin A, et al. Mavhome: an agent-based smart home. In: Proceedings of the first IEEE international conference on pervasive computing and communications, 2003 (PerCom 2003); March 2003. p. 521–4.

[52] Lee Jae Yong, Choi Seong Gon. Linear programming based hourly peak load shaving method at home area. In: 2014 16th international conference on advanced communication technology (ICACT); February 2014. p. 310–3. <http://dx.doi.org/10.1109/ICACT.2014.6778971>.

[53] Lee Junghoon, Kim Hye-Jin, Park Gyung-Leen, Kang Mikyung Energy consumption scheduler for demand response systems in the smart grid J Inf Sci Eng, 28 (5) (2012), pp. 955-969 ISSN 10162364

[54] M. Beaudin, A. Kiani, H. Zareipour, A. Schellenberg Residential energy management using a two-horizon algorithm

IEEE Trans Smart Grid (2013)

[55] Beaudin M, Zareipour H, Schellenberg A. A framework for modelling residential prosumption devices and electricity tariffs for residential demand response. IEEE Trans Smart Grids. Available [online]: < <http://www.ucalgary.ca/hzareipo/files/hzareipo/part1.pdf> > ; March 2014.

[56] Beaudin M, Zareipour H, Schellenberg A. Optimal energy scheduling under diverse residential electricity tariffs: Part II—evaluation. Submitted with it's companion

paper “Optimal energy scheduling under diverse residential electricity tariffs: Part I—modelling”; November 2013.

[57] Roe C, Meliopoulos S, Entriaken R, Chhaya S. Simulated demand response of a residential energy management system. In: 2011 IEEE Energytech; 2011. p. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/EnergyTech.2011.5948530>.

[58] Ting Huang, Derong Liu A self-learning scheme for residential energy system control and management Neural Comput Appl, 22 (2) (2013), pp. 259-269, 10.1007/s00521-011-0711-6 ISSN 0941-0643. URL <<http://proxy2.hec.ca:2098/10.1007/s00521-011-0711-6>>

[59] T.T. Kim, H.V. Poor Scheduling power consumption with price uncertainty IEEE Trans Smart Grid, 2 (September (3)) (2011), pp. 519-527, 10.1109/TSG.2011.2159279 ISSN 1949-3053

[60] Ying-Yi Hong, Jie-Kai Lin, Ching-Ping Wu, Chi-Cheng Chuang Multi-objective air-conditioning control considering fuzzy parameters using immune clonal selection programming IEEE Trans Smart Grid, 3 (4) (2012), pp. 1603-1610, 10.1109/TSG.2012.2210059 ISSN 1949-3053

[61] A. Dehnad, H. Shakouri A novel model of intelligent electrical load management by goal programming for smart houses, respecting consumer preferences Energy Power Eng, 5 (10) (2013), pp. 622-627

[62] C.O. Adika, Lingfeng Wang Autonomous appliance scheduling for household energy management IEEE Trans Smart Grid, 5 (March (2)) (2014), pp. 673-682, 10.1109/TSG.2013.2271427 ISSN 1949-3053

[63] Christopher O. Adika, Lingfeng Wang Smart charging and appliance scheduling approaches to demand side management Int J Electr Power Energy Syst, 57 (2014), pp. 232-240, 10.1016/j.ijepes.2013.12.004 ISSN 0142-0615

[64] A. Kailas, V. Cecchi, A. Mukherjee A survey of communications and networking technologies for energy management in buildings and home automation J Comput Netw Commun, 2012 (2012) 12pp (Article ID 932181), <http://proxy2.hec.ca:2098/10.1155/2012/932181>

[65] Zhi Chen, Lei Wu, Yong Fu Real-time price-based demand response management for residential appliances via stochastic optimization and robust

optimization IEEE Trans Smart Grid, 3 (December (4)) (2012), pp. 1822-1831, 10.1109/TSG.2012.221272 ISSN 1949-3053

[66] J. Laurent, G. Desaulniers, R. Malhame, F. Soumis A column generation method for optimal load management via control of electric water heaters IEEE Trans Power Syst, 10 (August (3)) (1995), pp. 1389-1400, 10.1109/59.466513 ISSN 0885-8950

[67] Li Na, Chen Lijun, Low SH. Optimal demand response based on utility maximization in power networks. In: 2011 IEEE power and energy society general meeting; July 2011. p. 1–8. <http://dx.doi.org/10.1109/PES.2011.6039082>.

[68] J. Paatero, P. Lund A model for generating household electricity load profiles Int J Energy Res, 30 (5) (2006), pp. 273-290

[69] M. Pedrasa, T. Spooner, I. MacGill Scheduling of demand side resources using binary particle swarm optimization

IEEE Trans Power Syst, 24 (August (3)) (2009), pp. 1173-1181, 10.1109/TPWRS.2009.2021219 ISSN 0885-8950

70] M. Pedrasa, T. Spooner, I. MacGill Coordinated scheduling of residential distributed energy resources to optimize smart home energy services IEEE Trans Smart Grid, 1 (September (2)) (2010), pp. 134-143, 10.1109/TSG.2010.2053053 ISSN 1949-3053

[71] Shao Shengnan, Zhang Tianshu, Pipattanasomporn Manisa, Rahman Saifur. Impact of Tou rates on distribution load shapes in a smart grid with phev penetration. In: Transmission and distribution conference and exposition, 2010 IEEE PES; April 2010. p. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/TDC.2010.5484336>.

[72] M. Stadler, W. Krause, M. Sonnenschein, U. Vogel Modelling and evaluation of control schemes for enhancing load shift of electricity demand for cooling devices Environ Model Softw, 24 (2) (2009), pp. 285-295, 10.1016/j.envsoft.2008.07.003 ISSN 1364-8152

73] Tiptipakorn S, Lee W. A residential consumer-centered load control strategy in real-time electricity pricing environment. In: 2007 39th North American power symposium; October 2007. p. 505–10. <http://dx.doi.org/10.1109/NAPS.2007.4402357>.

[74] T. Yu, D. Kim, S. Son Optimization of scheduling for home appliances in conjunction with renewable and energy storage resources Int J Smart Home, 7 (4) (2013), pp. 261-271 ISSN 19754094

[75] Ziming Zhu, S. Lambbotharan, Woon Hau Chin, Zhong Fan Overview of demand management in smart grid and enabling wireless communication technologies IEEE Wirel Commun, 19 (June (3)) (2012), pp. 48-56, 10.1109/MWC.2012.6231159 ISSN 1536-1284

[76] Tony Flick, Justin Morehouse Securing the smart grid: next generation power grid security Elsevier, MA, USA (2010)

[77] Emilio Ancillotti, Raffaele Bruno, Marco Conti The role of communication systems in smart grids: architectures, technical solutions and research challenges Comput Commun, 36 (17–18) (2013), pp. 1665-1697, 10.1016/j.comcom.2013.09.004 ISSN 0140-3664

[78] Alvaro Llaría, Jaime Jiménez, Octavian Curea Study on communication technologies for the optimal operation of smart grids

Trans Emerg Telecommun Technol (2013), 10.1002/ett.2625 ISSN 2161-3915

[79] Xi Fang, Satyajayant Misra, Guoliang Xue, Dejun Yang Smart grid—the new and improved power grid: a survey

IEEE Commun Surv Tutor, 14 (4) (2012), pp. 944-980, 10.1109/SURV.2011.101911.00087 ISSN 1553-877X

[80] Kosek AM, Costanzo GT, Bindner HW, Gehrke O. An overview of demand side management control schemes for buildings in smart grids. In: 2013 IEEE International conference on smart energy grid engineering (SEGE); August 2013. p. 1–9. <http://dx.doi.org/10.1109/SEGE.2013.6707934>.

[81] Pierluigi Siano Demand response and smart grids a survey Renew Sustain Energy Rev, 30 (2014), pp. 461-478, 10.1016/j.rser.2013.10.022 ISSN 1364-0321

[82] Venter G. Review of Optimization Techniques Encyclopedia of Aerospace Engineering (2010), 10.1002/9780470686652.eae495

[83] Tamaki H, Kita H, Kobayashi S. Multi-objective optimization by genetic algorithms: a review. In: Proceedings of IEEE international conference on evolutionary

computation, 1996; May 1996. p. 517–522.
<http://dx.doi.org/10.1109/ICEC.1996.542653>.

[84] Susanne Albers Online algorithms: a survey *Math Program*, 97 (1–2) (2003), pp. 3–26, 10.1007/s10107-003-0436-0 ISSN 0025-5610

[85] R. Marler, J. Arora Survey of multi-objective optimization methods for engineering *Struct Multidiscip Optim*, 26 (April (6)) (2004)

[86] Sebastian Engell, Iiro Harjunoski Optimal operation: scheduling, advanced control and their integration *Comput Chem Eng*, 47 (2012), pp. 121–133 ISSN 0098-1354. <http://proxy2.hec.ca:2098/10.1016/j.compchemeng.2012.06.039>. {FOCAPO}

[87] Javaid N, Khan I, Ullah MN, Mahmood A, Farooq MU. A survey of home energy management systems in future smart grid communications. In: 2013 Eighth international conference on broadband and wireless computing, communication and applications (BWCCA); October 2013. p. 459–64. <http://dx.doi.org/10.1109/BWCCA.2013.80>.

[88] Ullah MN, Mahmood A, Razzaq S, Ilahi M, Khan RD, Javaid Nadeem. A survey of different residential energy consumption controlling techniques for autonomous DSM in future smart grid communications. *CoRR*, abs/1306.1134, 2013.

[89] NRC. Survey of household energy use 2007. Technical report. Natural Resources Canada; 2010.

[90] Sebastian Gottwalt, Wolfgang Ketter, Carsten Block, John Collins, Christof Weinhardt Demand side management—simulation of household behavior under variable prices *Energy Policy*, 39 (12) (2011), pp. 8163–8174, 10.1016/j.enpol.2011.10.016 ISSN 0301-4215

[91] Zhu Ziming, Tang Jie, Lambbotharan S, Chin Woon Hau. An integer linear programming based optimization for home demand-side management in smart grid. In: Innovative smart grid technologies (ISGT). 2012 IEEE PES; January 2012. p. 1–5. <http://dx.doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175785>.

[92] Barbato A, Capone A, Chen Lin, Martignon F, Paris S. A power scheduling game for reducing the peak demand of residential users. In: 2013 IEEE online conference on green communications (GreenCom); October 2013. p. 137–42. <http://dx.doi.org/10.1109/OnlineGreenCom.2013.6731042>.

[93] Naveed Ul Hassan, Muhammad Adeel Pasha, Chau Yuen, Shisheng Huang, Xiumin Wang

Impact of scheduling flexibility on demand profile flatness and user inconvenience in residential smart grid system *Energies*, 6 (12) (2013), pp. 6608-6635, 10.3390/en6126608 ISSN 1996-1073. URL <<http://www.mdpi.com/1996-1073/6/12/6608>>

[94] J. van Tonder, I. Lane A load model to support demand management decisions on domestic storage water heater control strategy

IEEE Trans Power Syst, 11 (November (4)) (1996), pp. 1844-1849, 10.1109/59.544652 ISSN 0885-8950

[95] L. Yao, W. Chang, R. Yen An iterative deepening genetic algorithm for scheduling of direct load control *IEEE Trans Power Syst*, 20 (August (3)) (2005), pp. 1414-1421, 10.1109/TPWRS.2005.852151 ISSN 0885-8950

[96] Lu Ning, Chassin DP. A state queueing model of thermostatically controlled appliances. In: *Proceedings of IEEE PES power systems conference and exposition*; 2004. <http://dx.doi.org/10.1109/PSCE.2004.1397437>.

[97] N. Gatsis, G.B. Giannakis Residential load control: distributed scheduling and convergence with lost ami messages *IEEE Trans Smart Grid*, 3 (June (2)) (2012), pp. 770-786, 10.1109/TSG.2011.2176518 ISSN 1949-3053

[98] Molderink A, Bakker V, Hurink J, Smit G. Algorithms for balancing demand-side load and micro-generation in islanded operation. In: *The 19th international conference on systems engineering*; August 2008. p. 115–20. <http://proxy2.hec.ca:2098/10.1109/ICSEng.2008.50>.

[99] Bakker V, Molderink A, Hurink J, Smit G. Domestic heat demand prediction using neural networks. In: *The 19th international conference on systems engineering*; August 2008. p. 189–194. <http://dx.doi.org/10.1109/ICSEng.2008.51>.

[100] M. Bosman, V. Bakker, A. Molderink, J. Hurink, G. Smit Scheduling microchps in a group of houses *Glob J Technol Optim*, 1 (June) (2010)

[101] NRC. Energy use data handbook 1990–2008. Technical report. Natural Resources Canada; 2011.

[102] NRC. Energy consumption of major household appliances shipped in Canada, summary report. Technical report M141-16/1-2007. Natural Resources Canada; 2009.

[103] EPA; November 2013.

[104] Galus MD, Andersson G. Demand management of grid connected plug-in hybrid electric vehicles (phev). In: Energy 2030 conference, 2008. ENERGY 2008. Atlanta, Georgia: IEEE; November 2008. p. 1–8. <http://dx.doi.org/10.1109/ENERGY.2008.4781014>.

[105] S. Salinas, Ming Li, Pan Li Multi-objective optimal energy consumption scheduling in smart grids IEEE Trans Smart Grid, 4 (March (1)) (2013), pp. 341-348, 10.1109/TSG.2012.2214068 ISSN 1949-3053

[106] Sou Kin Cheong, Weimer J, Sandberg H, Johansson KH. Scheduling smart home appliances using mixed integer linear programming. In: 2011 50th IEEE conference on decision and control and European control conference (CDC-ECC); December 2011. p. 5144–9. <http://proxy2.hec.ca:2098/10.1109/CDC.2011.6161081>.