



HAL
open science

Analyse de la flexibilité des usages électriques résidentiels : application aux usages thermiques

David da Silva

► **To cite this version:**

David da Silva. Analyse de la flexibilité des usages électriques résidentiels : application aux usages thermiques. Energie électrique. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011. Français. NNT : 2011ENMP0070 . pastel-00678316

HAL Id: pastel-00678316

<https://pastel.hal.science/pastel-00678316>

Submitted on 12 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École nationale supérieure des mines de Paris

Spécialité " Énergétique "

présentée et soutenue publiquement par

David Da SILVA

1^{er} décembre 2011

Analyse de la flexibilité des usages électriques résidentiels

Application aux usages thermiques

Directeur de thèse : **Jérôme ADNOT**

Co-encadrement de la thèse : **Bruno DUPLESSIS**

Jury

M. Stéphane PLOIX, Professeur, G-SCOP, Institut Polytechnique de Grenoble

M. Joseph VIRGONE, Professeur, CETHIL, Université Lyon 1

M. Jérôme ADNOT, Professeur, CEP, Mines-Paristech

M. Dominique MARCHIO, Professeur, CEP, Mines-Paristech

M. Roch DRODOWSKI, Responsable de l'effacement diffus Résidentiel et Tertiaire, GDF SUEZ

Mme. Anne-Sophie COINCE, Responsable gestion dynamique de l'électricité, EDF R&D

M. Bruno DUPLESSIS, Docteur, CEP, Mines-Paristech

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

T
H
È
S
E

MINES ParisTech

Centre Énergétique et Procédés

60, boulevard Saint Michel – 75272 paris Cedex 06

Remerciements

Je tiens à remercier vivement Jérôme Adnot, mon Directeur de thèse, pour m'avoir reçu dans le Centre Energétique et Procédés en tant que son doctorant. Je le remercie d'avoir suivi et dirigé ce travail, tout en me laissant une certaine liberté sur le sujet de thèse. Je le remercie aussi pour sa disponibilité en toutes circonstances professionnelles ou personnelles.

Je remercie également Bruno Duplessis, mon Maitre de thèse, qui a également dirigé ce travail. Il l'a toujours fait avec humour, tout en gardant un regard critique, ce qui ma permis de mener à bien mes travaux.

J'exprime toute ma gratitude à M.Virgone, Professeur à l'INSA Lyon, ainsi qu'à M. Ploix, Enseignant à l'INP Grenoble, pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse et pour l'honneur qu'ils m'ont fait de prendre part au jury.

Je tiens aussi à remercier Dominique Marchio, Professeur à Mines Paristech, pour sa participation à ce jury de thèse et pour son soutien et ses encouragements.

Je remercie également Joël Senpauroca, Professeur à Mines Paristech, pour les échanges et réflexions en matière de concepts orientés objet, qui m'ont été très utiles pendant mes travaux.

Un tel travail aurait pu difficilement être mené sans toutes les interactions bénéfiques avec mes collègues de travail. Un grand merci à tous mes collègues du CEP Paris (Philippe, Pascal, Olivier, Cyril, Ozlem, Maxime, Thomas, Charles, ...) qui m'ont permis de réaliser ces travaux dans une ambiance réellement motivante et très amusante (une partie de baby-foot ?).

Je n'oublie pas non plus mes ex-collègues et amis (Laurent, Anthony, Ana, David, Rodrigo...), qui ont fait partie de cette expérience inoubliable et à qui vont aussi mes remerciements. Je tiens à remercier spécialement Julien Caillet pour son soutien et pour nos aventures glissantes.

Enfin, je ne pourrais pas oublier Cristina qui m'a soutenu et ma donné la force et le courage nécessaires pour aller toujours plus loin.

Table de matières

Contexte de la thèse	1
1. Potentiel d'action sur la demande électrique résidentielle	10
1.1. Analyse des consommations électriques et des périodes critiques du réseau électrique	11
1.1.1. Chauffage électrique.....	13
1.1.2. Eau Chaude Sanitaire (ECS)	20
1.1.3. Cuisson.....	22
1.1.4. Electroménager Froid et Lavage	22
1.1.5. Climatisation.....	26
1.1.6. Eclairage, Produits gris et bruns et autres équipements.....	27
1.1.7. Action sur les modes de veille des équipements électriques résidentiels.....	27
1.2. Analyse de l'aptitude des usages électriques domestiques à la gestion de la demande selon les études existantes	27
1.2.1. Chauffage et Climatisation.....	28
1.2.2. Eau Chaude Sanitaire (ECS)	36
1.2.3. Cuisson.....	37
1.2.4. Machine à Laver	38
1.2.5. Sèche-linge	39
1.2.6. Lave-vaisselle.....	40
1.2.7. Réfrigérateurs / Congélateurs.....	40
1.2.8. Synthèse de l'étude sur le potentiel des équipements résidentiels pour la gestion de la demande	42
1.3. Conclusion - Potentiel d'action sur la demande électrique résidentielle	44
2. Méthodologie pour repérer des stratégies de contrôle dans les équipements électriques	48
2.1. Analyse des langages de représentation graphique existants	49
2.1.1. Représentation d'une machine à laver par le langage GRAFCET.....	50
2.1.2. Représentation d'une machine à laver par le langage UML.....	55
2.2. Description du langage graphique proposé « Identification of load control availability » (ILCA)	59
2.3. Principaux états de fonctionnement	62

2.4.	Méthodologie d'application du langage graphique ILCA.....	63
2.4.1.	Niveau utilisateur.....	63
2.4.2.	Niveau constructeur.....	63
2.5.	Application du langage ILCA à une machine à laver	64
2.5.1.	Analyse niveau utilisateur – machine à laver.....	64
2.5.2.	Analyse constructeur - machine à laver.....	68
2.6.	Comparaison du langage ILCA et des autres langages de représentation graphique	76
2.7.	Conclusion - développement de la méthode d'application ILCA.....	77
3.	Méthodologie d'évaluation de la flexibilité du chauffage électrique	80
3.1.	Méthode d'évaluation des stratégies de contrôle pour le chauffage électrique	81
3.2.	Analyse des outils de simulation dynamique du bâtiment existants.....	82
3.2.1.	Modèles de réduction polynomiales.....	83
3.2.2.	Optimisation des modèles thermiques.....	88
3.2.3.	Techniques de transformation basées sur des variables d'état.....	88
3.3.	Description du modèle de simulation du bâtiment mis en œuvre.....	89
3.3.1.	Modèle de simulation de la conduction de chaleur à travers de la structure du bâtiment	94
3.4.	Confort thermique des occupants.....	105
3.5.	Procédure d'évaluation du contrôle du chauffage électrique	107
3.5.1.	Définition des indicateurs pour l'analyse de la flexibilité.....	109
3.6.	Conclusion – Méthodologie d'évaluation du chauffage électrique.....	112
4.	Evaluation de la flexibilité du chauffage électrique	116
4.1.	Application de la méthode ILCA à un convecteur électrique	117
4.1.1.	Application du langage ILCA niveau utilisateur au cas du convecteur électrique.....	117
4.1.2.	Application du langage ILCA niveau constructeur - convecteur électrique.....	118
4.2.	Caractéristiques des bâtiments simulés.....	121
4.3.	Etude de l'impact des différentes stratégies de contrôle	124
4.3.1.	Etude de la Coupure Simple du chauffage électrique.....	125
4.3.2.	Coupure avec condition de bande morte.....	138
4.3.3.	Coupure avec arrêt de la ventilation mécanique.....	142
4.3.4.	Coupure avec préchauffage.....	145
4.3.5.	Passage en mode-éco.....	150

4.3.6.	Analyse de sensibilité sur les variables de calcul du bâtiment.....	152
4.3.7.	Applicabilité des stratégies de contrôle.....	162
4.4.	Sélection d'une stratégie de contrôle	162
4.4.1.	Analyse énergétique.....	163
4.4.2.	Impact énergétique vs inconfort.....	164
4.5.	Analyse des gains monétaires pour le consommateur	165
4.6.	Conclusion – Evaluation de la flexibilité du chauffage électrique	171
5.	Analyse de l'impact des stratégies de contrôle sur le réseau de distribution	176
5.1.	Coupure simple.....	176
5.2.	Coupure foisonnée des bâtiments.....	177
5.3.	Coupure pendant 2 heures avec condition de bande morte	179
5.4.	Coupure sans inconfort.....	181
5.5.	Coupure avec Préchauffage.....	181
5.6.	Passage en mode-éco	182
5.7.	Analyse des effets énergétiques	183
5.8.	Conclusion – Analyse de l'impact des stratégies de contrôle sur le réseau de distribution..	186
	
	Conclusion générale	190
	Éléments de perspective	192
	References.....	194
	ANNEXE I - Méthodes simplifiées pour le calcul des évolutions de température	
	infra-horaires.....	201
	Annexe II - Room air conditioner load control under summer comfort constraint..	
	208
	Annexe III - Evaluation of thermal appliances demand response actions in the	
	electrical market.....	221
	ANNEXE IV – Analyse de la réponse des parois décrites en 3.3.1.1 en fréquence et à	
	un échelon de température.....	235
	ANNEXE V – Résultats détaillés des stratégies de contrôle.....	239

Contexte de la thèse

Contexte de la thèse

Avec la croissance démographique et l'augmentation du taux d'équipement des ménages, le système électrique de nombreux pays de l'Union Européenne est de plus en plus sollicité malgré les différentes politiques mises en place en faveur de la réalisation d'économies d'énergie. Ces pays sont donc amenés à envisager l'augmentation des moyens de production et des capacités de transport en particulier pour faire face à la demande en électricité aux heures de pointe. Le problème c'est que ces moyens de production de pointe représentent un risque à l'investissement plus élevé que les autres types de centrales [Hoffer & Charton, 2011] et qu'elles utilisent des combustibles fossiles. Ces centrales s'avèrent coûteuses et plus fortes émettrices de CO₂.

L'alternative à l'investissement dans ces moyens de production et au renforcement des réseaux pourrait être la mise en œuvre de programmes ambitieux de gestion de la demande.

La gestion de la demande permettrait d'éviter la construction de nouvelles centrales de production d'électricité dite « de pointe » ainsi que le renforcement des réseaux de transport de l'électricité, car elle déplace la consommation des heures de pointe avec une certaine «flexibilité», soit en incitant les consommateurs à le faire (retour d'information au client ou utilisation de signal-prix sur l'électricité), soit en prenant le contrôle à distance des appareils.

Pendant les périodes de fortes pointes électriques, l'opérateur du réseau peut faire appel aux industriels, voire au tertiaire, pour qu'ils réduisent leur consommation. Les secteurs industriel et tertiaire sont intéressants pour la gestion de la demande car les puissances effacées par site sont très importantes. En retour les clients sont payés avec une indemnité à cause de la réduction voir de l'arrêt de leur activité. Ce schéma est connu comme « *Demand side bidding* » [Albadi & El-Saadany, 2008].

La gestion de la demande dans le secteur résidentiel n'est pas très développée alors même que ce secteur représente environ 29 % [Bertoldi & Atanasiu, 2007] de la consommation d'électricité totale en Europe. Avec le développement des technologies de communication et les réseaux intelligents, plusieurs projets de recherche et d'expérimentation commencent à tester la possibilité d'implémentation à large échelle de la gestion de la demande dans le secteur résidentiel [Piette et al., 2007], [KEMA, 2006], [Fromby, 2007], entre autres. Ces programmes de gestion de la demande sont aussi connus comme programmes de « *Demand Response* ».

Les programmes de gestion de la demande peuvent être définis par la réponse ou le changement du comportement face à des modifications du prix d'électricité [[Albadi & El-Saadany, 2008]. Ces programmes peuvent aussi comprendre des incitations monétaires désignées pour que les consommateurs réduisent leur consommation d'électricité lorsque le système électrique est en défaillance ou lorsque les prix sur le marché d'électricité sont très élevés.

Ainsi on peut définir deux groupes de programmes de DR [Albadi & El-Saadany, 2008]: Programmes basés sur les prix d'électricité et des programmes basés sur des incitations monétaires.

Dans les premiers, on trouve des différentes tarifications, comme « *Time of Use* » (TOU), « *Critical peak pricing* » (CPP), « *Real time pricing* » (RTP).

«**Time of use**» (TOU) – ce type de tarification est un des plus simples et il typiquement composé de deux périodes avec des prix différents : un prix pour les heures creuses et un prix plus élevée pendant les heures creuses.

«**Critical peak pricing**» (CPP) – ces tarifs sont essentiellement identiques au tarif TOU ou au tarif de base (prix constant), mais avec un prix légèrement plus faible. Quand les prix sur le marché deviennent élevés ou pendant situations de « stress » du réseau électrique des prix élevés sont demandés pendant quelques heures.

«**Real time pricing**» (RTP) – Ces tarifications sont des tarifs avec un prix variable toutes les heures qui reflète le prix réel de l'électricité sur le marché de d'électricité. Les clients sont informés du prix la veille ou avec une heure d'avance.

Ces tarifications peuvent donner une incitation aux consommateurs pour réduire/déplacer leur consommation vers les périodes à faible prix. Ce comportement permettra de réduire la demande pendant les heures où le réseau est plus chargé ou quand les prix dans le marché d'électricité sont plus élevés. Du côté des consommateurs se changement de comportement est récompensé par des économies monétaires dans la facture d'électricité car le prix de l'électricité hors pic est moins élevé que les tarifs de référence (TOU).

Ce changement de comportement peut être mesuré par l'élasticité au prix d'électricité¹.

Les tarifications CPP sont parfois implémentées en parallèle avec des gestionnaires d'énergie ou énergie box, qui une fois un signal de prix élevé reçu vont réduire/effacer automatiquement la consommation des équipements [Piette et al., 2007].

Cependant, des tarifs comme le RTP seront difficilement implémentés dans le secteur résidentiel si une automation de la consommation du bâtiment n'est pas mise en place. A cause de la variation des prix d'électricité, des systèmes de gestion avancée devront être mis en place pour permettre de profiter au maximum de ces tarifs, tout en préservant le confort des occupants.

Un autre type de programmes de DR ce sont des programmes où les équipements électriques sont contrôlés à distance par des agrégateurs, gestionnaires du réseau ou par les fournisseurs. Comme récompense les consommateurs qui participent dans ces programmes reçoivent des incitations monétaires ou des réductions dans leur facture d'électricité. La dérogation à ces contrôles par les consommateurs entrainera des pénalités.

Ces deux formes de gestion de la demande permettront de donner au système électrique une assurance plus grande en apportant une flexibilité inexistante avant.

Il existe en effet encore quelques barrières à vaincre pour qu'on puisse profiter des avantages de la gestion de la demande, notamment le manque actuel de disponibilité d'infrastructures de communication et de la compréhension des bénéfices de la gestion de la demande [Strbac, 2008]. Ainsi, la mise en œuvre de programmes ambitieux de la gestion de la demande nécessite d'une part, le développement d'une infrastructure avancée en communication, comptage, moyens de contrôle et

¹ -Elasticité du prix - correspond à la réduction de la demande en fonction des changements des prix d'électricité. Plus le prix sera haut, plus de réductions sont atteintes de la part des consommateurs [U.S._Department_of_Energy, 2006].

d'information et d'autre part la création de méthodologies de quantification des gains et de leur répartition entre les différents acteurs.

Le déploiement des compteurs communicants dits « intelligents », en Europe, permettra de combler une partie des failles en termes de communication des tarifs. D'autres technologies commencent à faire leur apparition comme des « Energy box² » qui via internet permettent d'avoir des relevés précis et dans quelques cas de piloter des équipements.

Cependant des méthodologies de quantification de la flexibilité apportée par les divers équipements résidentiels au réseau électrique et de ses impacts restent à déterminer.

La présente thèse a ainsi pour objectifs de caractériser le potentiel de la gestion de la demande dans le secteur résidentiel et de déterminer les gains pour les particuliers, les acteurs du système électrique ou pour la collectivité que l'on peut attendre de sa mise en œuvre.

Pour cela, nous avons d'abord cherché à analyser sur la flexibilité des équipements électriques domestiques en s'appuyant sur les périodes d'utilisation et leur consommation globale. Cette analyse nous permettra dans une première instance de déterminer l'impact et le potentiel de la gestion de la demande pour les différents équipements résidentiels. La flexibilité des équipements peut être définie comme la capacité de décalage, modulation ou arrêt du fonctionnement d'un équipement électrique soumis à des contraintes d'acceptabilité.

Pour analyser en détail la flexibilité d'un équipement, il faut d'abord savoir quelles sont les options de contrôle disponibles et quelles améliorations peuvent être mis en œuvre pour rendre un équipement ordinaire plus intéressant pour la gestion de la demande.

Pour cela, nous avons développé une méthodologie basée sur un langage graphique, qui va nous permettre de trouver des stratégies de contrôle sur les différents équipements électriques résidentiels d'une manière systématique.

Un des équipements ayant un potentiel non négligeable est le chauffage électrique car ces équipements représentent d'une part, une grande partie de la consommation d'électricité et d'autre part ils surchargent le réseau électrique lors des jours très froids (gradient français de l'ordre de 2300 W/°C). Comme le fonctionnement du chauffage est grandement dépendant de la dynamique du bâtiment, un modèle de simulation est construit permettant de faire la liaison chauffage + bâtiment. Ce modèle va nous permettre de pouvoir quantifier avec précision les impacts des contrôles du chauffage électrique et les conditions thermiques à l'intérieur du bâtiment.

Cette analyse est poursuivie par l'étude des impacts du contrôle de la charge sur les consommations électriques et sur les appels de puissance du chauffage électrique ainsi que sur les conditions de confort des consommateurs final.

Dans un second temps, nous réaliserons une analyse coût-bénéfice pour le consommateur. De plus différentes stratégies de contrôle seront simulées au niveau d'un parc de bâtiments, pour ainsi déterminer leurs impacts à grande échelle.

² - « Energy Box » - boîtiers qui donnent accès au relevé détaillé de consommation en temps réel et que dans certains cas permettent le contrôle des équipements.

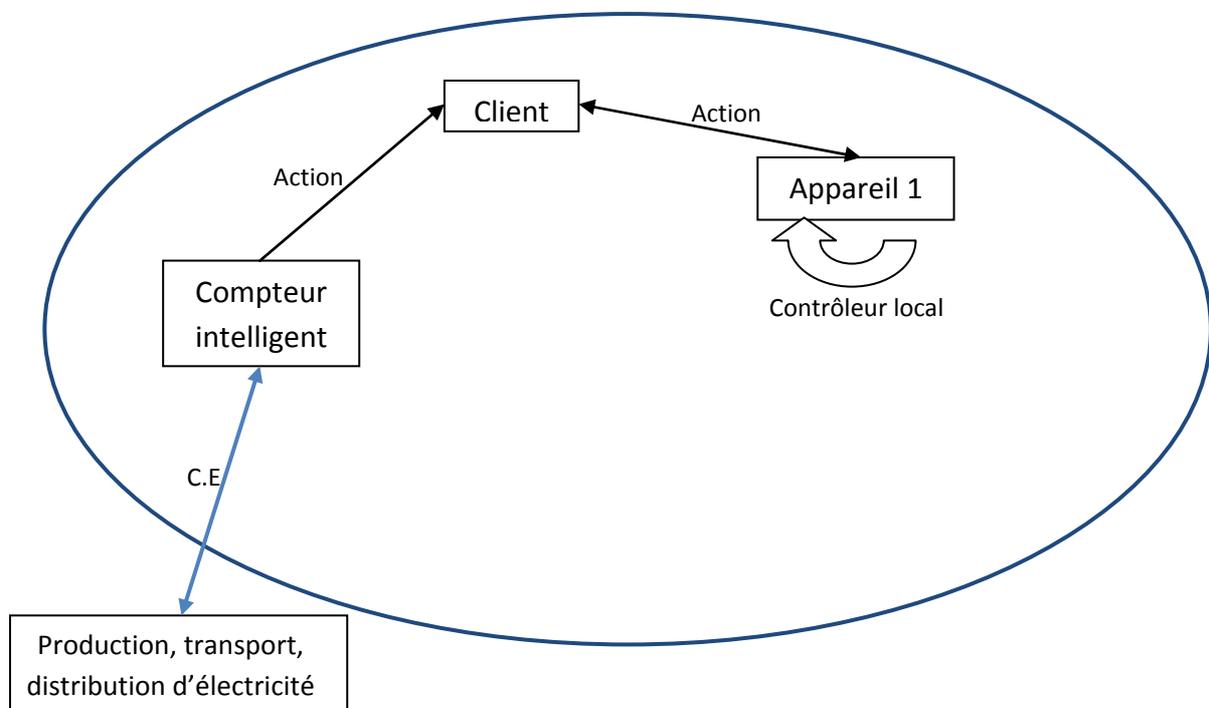
Pour pouvoir comprendre et limiter le système physique en analyse, il faut définir des modes de communication entre les appareils et les contrôleurs. A la suite, on présente les architectures possibles du système en analyse dans la présente étude.

Architectures du système

Le système en *focus* dans cette thèse comprend les différents appareils d'un logement et ces divers modes de communication. Comme on l'a vu précédemment, les programmes de gestion de la demande peuvent être appliqués selon différentes voies : à travers des signaux de prix au par le contrôle à distance.

Ensuite nous présentons différentes possibilités d'interaction entre les équipements, les utilisateurs et/ou des différents acteurs du réseau électrique. Ces architectures permettront de délimiter ainsi le système en analyse en prenant quelques hypothèses en termes de la contrôlabilité des équipements ;

Cas 1 – Système Client



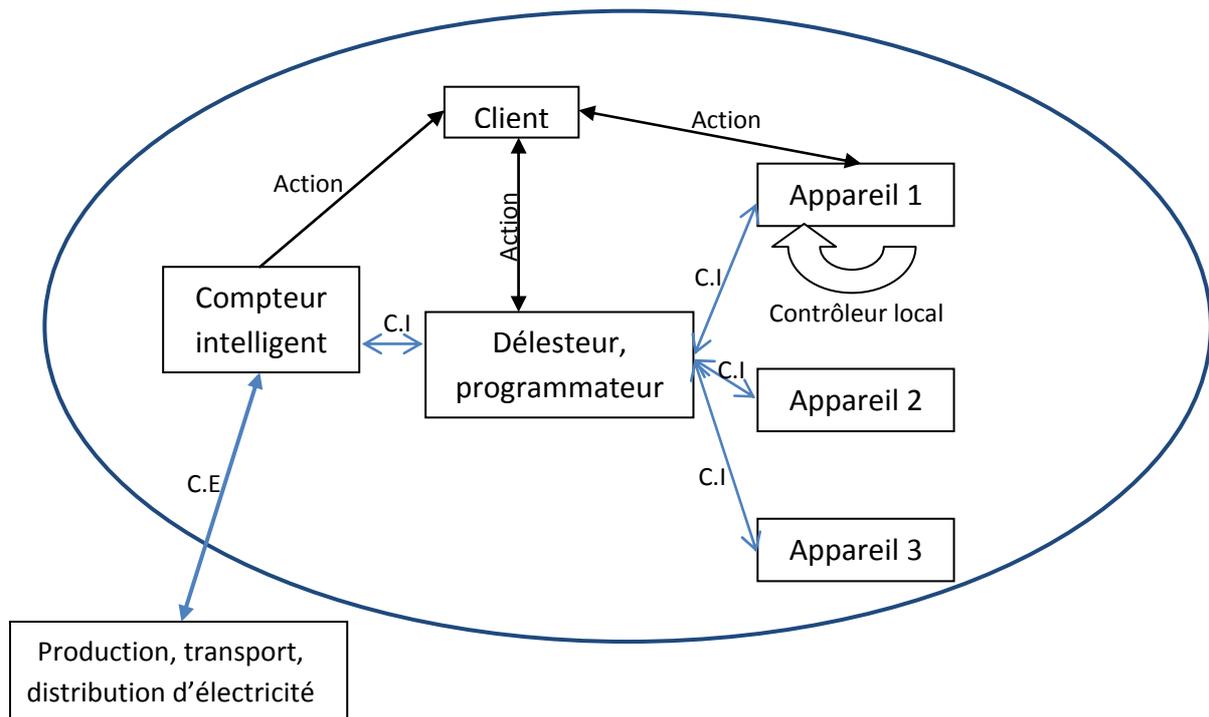
C.I – Communication interne à la maison, exemples : wireless, courant porteur,...

C.E – Communication extérieure à la maison, exemples : ligne électrique, GPRS, Internet, ...

Figure 0-1 – Système Client

Dans l'approche de la Figure 1, le client est le responsable de la modulation des équipements. Il reçoit des informations sur sa consommation et/ou sur le prix de l'électricité via un compteur intelligent. A partir de ces données le client pourra décider de modifier le fonctionnement d'un appareil, soit par une action directe sur l'équipement (débrancher l'appareil par exemple) soit par une action sur un contrôleur local (thermostat par exemple).

Cas 2 – Système Client – Programmeur - Délesteur



C.I – Communication interne à la maison, exemples : wireless, courant porteur,...

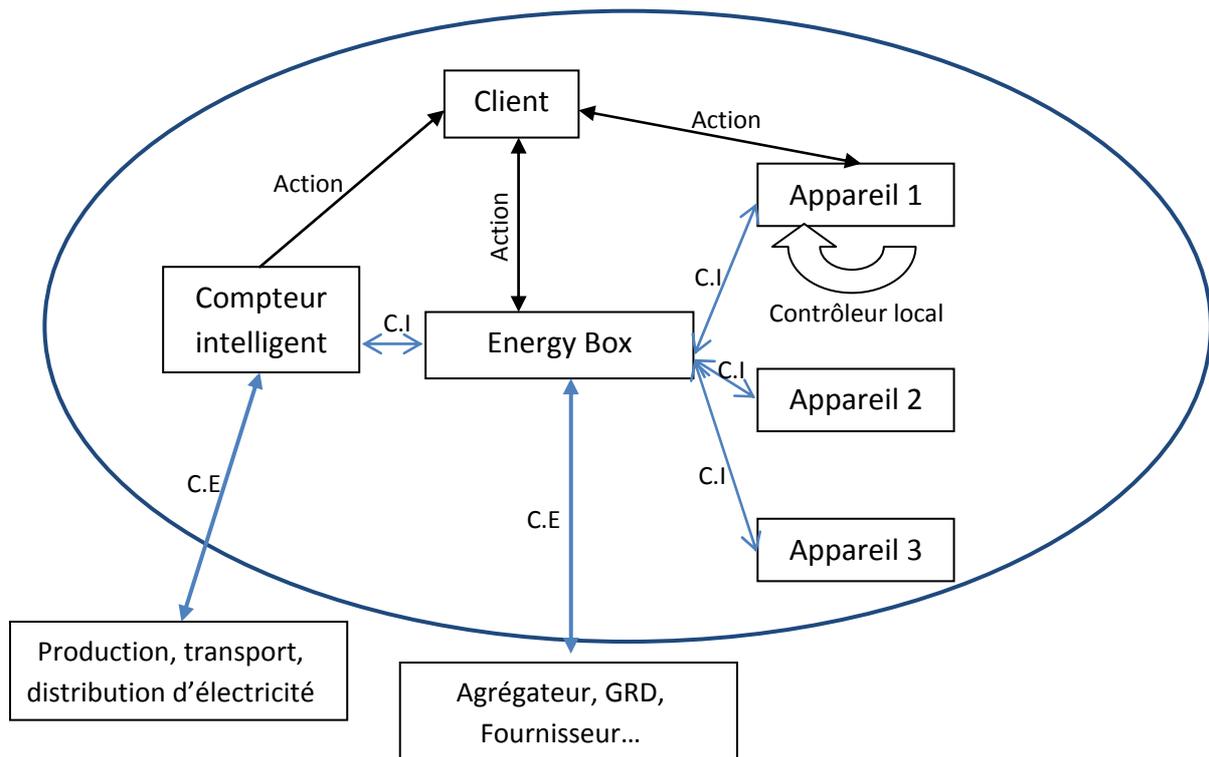
C.E – Communication extérieure à la maison, exemples : ligne électrique, GPRS, Internet, ...

Figure 0-2 – Système client – programmeur - Délesteur

Dans ce cas le client a à sa disposition un programmeur, délesteur ou même un gestionnaire d'énergie, qui lui permet de contrôler plusieurs équipements automatiquement. Les « gestionnaires d'énergie » vont contrôler les différents appareils selon la programmation faite par l'utilisateur. Ces gestionnaires sont normalement utilisés pour éviter des dépassements de la puissance électrique et pour une utilisation plus efficace de l'électricité dans la maison. Avec cette solution il sera plus facile pour le client de piloter ses équipements en accord avec la grille tarifaire de l'électricité.

Cependant le client aura toujours la totale liberté de modifier ou même d'arrêter cette « gestion ».

Cas 3 – Système « Energy box »



C.I – Communication interne à la maison, exemples : wireless, courant porteur,...

C.E – Communication extérieure à la maison, exemples : ligne électrique, GPRS, Internet, ...

Figure 0-3 – Système Energy box

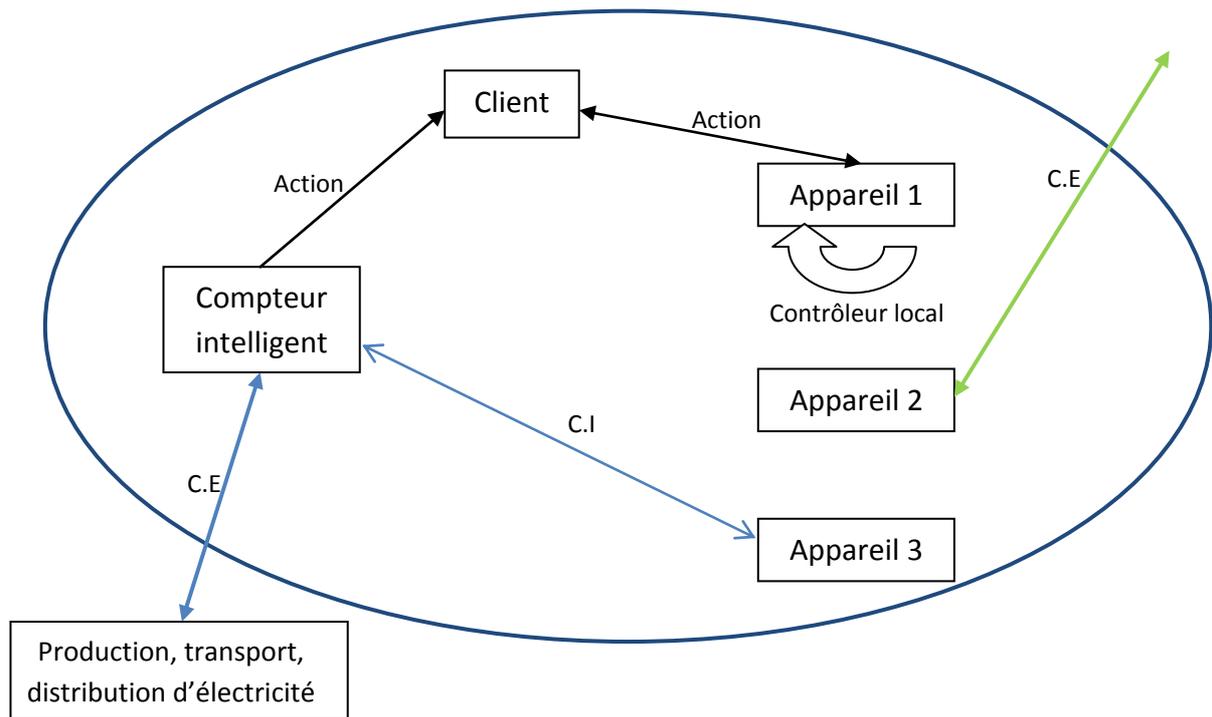
Dans ce troisième cas, au lieu d'un gestionnaire d'énergie qui pourra être programmé par l'utilisateur, on a une « Energy box ». L'avantage de l'« Energy box » est qu'elle communique dans les deux sens avec un « Agrégateur », qui peut être un gestionnaire du réseau de distribution ou un fournisseur ou un tiers, pour pouvoir piloter les équipements à distance.

Dans le cas d'une surcharge du réseau électrique, l'« Energy box » détermine le potentiel d'effacement de la maison et transmet cette information à un Agrégateur, qui décide ou non de faire usage de ce potentiel.

Mais l'« Energy box » permet aussi d'introduire un contrôle optimal des équipements dans la maison, parce qu'elle peut contrôler les équipements en fonction des tarifs en temps réel et ainsi modifier leur fonctionnement pour baisser le coût d'utilisation.

Néanmoins l'utilisateur aura toujours la possibilité de faire arrêter cette gestion à distance.

Cas 4 – Système Communication directe



C.I – Communication interne à la maison, exemples : wireless, courant porteur,...

C.E – Communication extérieure à la maison, exemples : ligne électrique, GPRS, Internet, ...

Figure 0-4 – Système Communication directe

Dans ce dernier cas le contrôle des équipements à distance est fait sans que l'utilisateur modifie son fonctionnement. Dans la Figure 4 on peut avoir une communication par la ligne électrique qui va déterminer le fonctionnement de l'appareil 3. Ce peut être le cas d'un ballon d'eau chaude sanitaire par exemple.

Une autre communication « directe » apparaît dans l'appareil 2, où le signal ne passe pas par la ligne électrique ni par le compteur intelligent mais par exemple à travers un GPRS.

Une fois qu'on a déterminé les frontières du système en analyse, on va maintenant commencer l'analyse du potentiel en termes de gestion de la demande des équipements électriques résidentiels.

Chapitre I – Potentiel d'action sur la demande électrique résidentielle

Table de Matières – Chapitre I

1. Potentiel d'action sur la demande électrique résidentielle	10
1.1. Analyse des consommations électriques et des périodes critiques du réseau électrique	11
1.1.1. Chauffage électrique.....	13
1.1.2. Eau Chaude Sanitaire (ECS)	20
1.1.3. Cuisson.....	22
1.1.4. Electroménager Froid et Lavage	22
1.1.5. Climatisation.....	26
1.1.6. Eclairage, Produits gris et bruns et autres équipements.....	27
1.1.7. Action sur les modes de veille des équipements électriques résidentiels.....	27
1.2. Analyse de l'aptitude des usages électriques domestiques à la gestion de la demande selon les études existantes	27
1.2.1. Chauffage et Climatisation.....	28
1.2.2. Eau Chaude Sanitaire (ECS)	36
1.2.3. Cuisson.....	37
1.2.4. Machine à Laver	38
1.2.5. Sèche-linge	39
1.2.6. Lave-vaisselle.....	40
1.2.7. Réfrigérateurs / Congélateurs.....	40
1.2.8. Synthèse de l'étude sur le potentiel des équipements résidentiels pour la gestion de la demande	42
1.3. Conclusion - Potentiel d'action sur la demande électrique résidentielle	44

1. Potentiel d'action sur la demande électrique résidentielle

Plusieurs équipements électriques sont présents dans les logements résidentiels. Cependant chaque équipement a une puissance nominale, un type d'usage par les utilisateurs et un taux de pénétration dans les logements différent. Ainsi l'impact des actions de la gestion de la demande (Effacement, actions de « Demand Response ») sera très différent en fonction de l'équipement électrique choisi.

La demande d'électricité est la résultante de la consommation d'électricité des différents usages par les consommateurs. Pour la majeure partie de ces usages et en l'absence des capacités de stockage, la consommation d'électricité est concomitante à la consommation d'usage final. Ainsi à quand de l'analyse de la flexibilité d'un équipement, il faut raisonner en prenant en compte deux caractéristiques différentes : la consommation et la courbe de charge ou puissance, i.e. comment l'énergie est consommée. L'importance de cette séparation est très importante car elle permettra de savoir combien d'énergie on peut déplacer/réduire mais aussi la puissance effacée/réduite pendant le contrôle de l'équipement. Néanmoins, il faut aussi regarder si l'impact sur les utilisateurs ou sur la fonction principale de l'équipement reste acceptable.

Pour regarder le potentiel d'un équipement en termes de gestion de la demande, il faut prendre en compte son impact sur la consommation globale (nationale) et sur les points plus fragiles du réseau électrique (périodes de pointes). En plus, il faut aussi regarder les évolutions technologiques et les spécificités d'utilisation (heures d'utilisation, courbes de charges individuelles...) des équipements.

On fait premièrement une analyse macroscopique (à l'échelle nationale) de la consommation des différents usages et des caractéristiques des pointes électriques (points plus critiques pour le réseau électrique).

Ensuite, on fait une analyse plus profonde, en analysant le fonctionnement, les heures typiques d'utilisation et les taux de pénétration dans les bâtiments existants, les taux d'utilisation des différents usages, ainsi que les perspectives futures d'évolutions technologiques et de consommation.

Après, on fait une revue bibliographique de la littérature scientifique et technique existante dans ce domaine, permettant ainsi de comprendre l'état de l'art sur la gestion de la demande. Cette revue permettra de déterminer des directions de travail en termes de contrôle des équipements selon différents buts. Dans une première approche, cette revue permettra de connaître les effets des contrôles, les modèles utilisés et les limitations de ces études.

Toute cette analyse permettra de déterminer, d'une manière simple, le potentiel de gestion de la demande au niveau national et local (maison), mais aussi le potentiel futur des usages électriques. Ainsi, en imaginant que des contrôles sont applicables (réduction de consommation, déplacement des heures de consommation...), on peut déterminer qualitativement leur impact sur le réseau électrique mais aussi sur la courbe de charge d'une maison.

Pour conclure, on fait une synthèse des potentiels de gestion de la demande des différents équipements électriques résidentiels.

1.1. Analyse des consommations électriques et des périodes critiques du réseau électrique

La prévision de croissance de la consommation résidentielle est de 1.3 % par an, selon le scénario de référence, jusqu'à 2015 et de 0.3 % au-delà, selon RTE [RTE, 2011]. Selon ce rapport de RTE [RTE, 2011] la distribution des différents usages en 2007, en France a été :

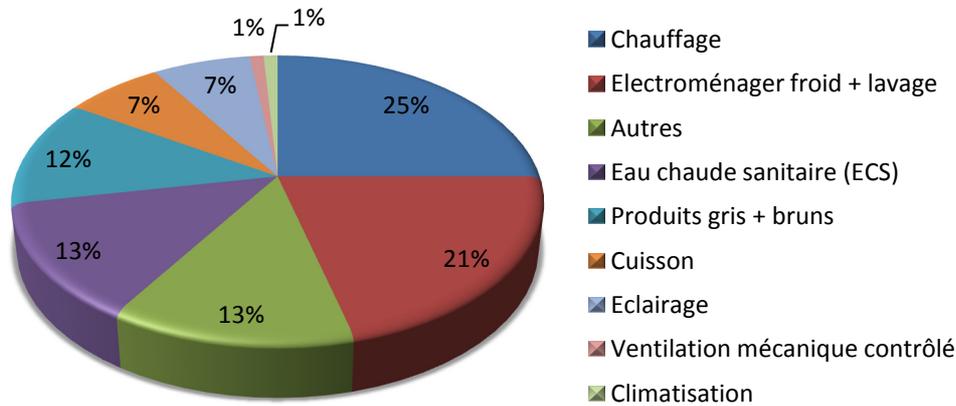


Figure 1-1 – Distribution de la consommation résidentielle par secteurs

A partir de la Figure 1-1, on peut voir que le chauffage, l'électroménager froid, le lavage, l'ECS sont responsables pour la grande partie de la consommation (environ 70%).

La problématique du réseau électrique se traduit par des pointes électriques qui ne cessent pas d'augmenter comme on peut voir sur la Figure 1-2 [RTE, 2011].

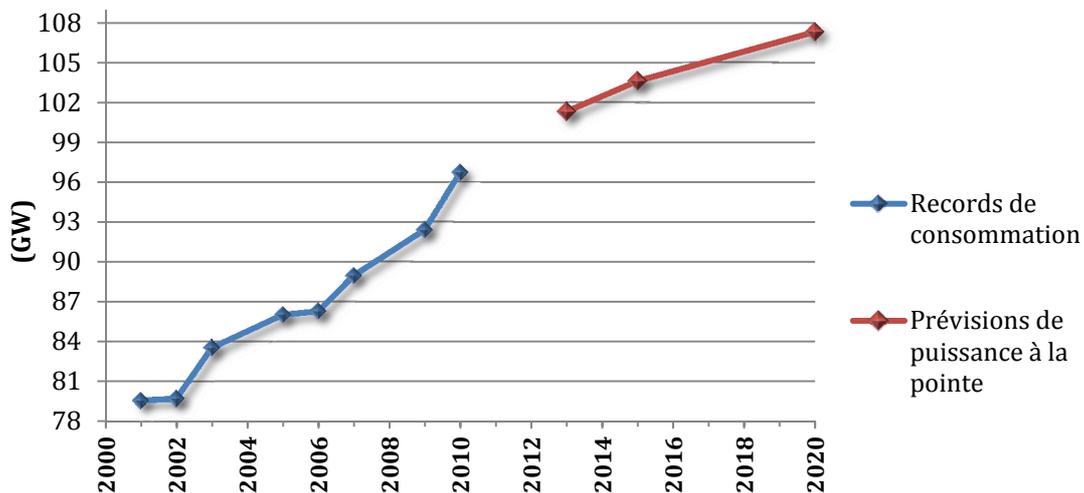
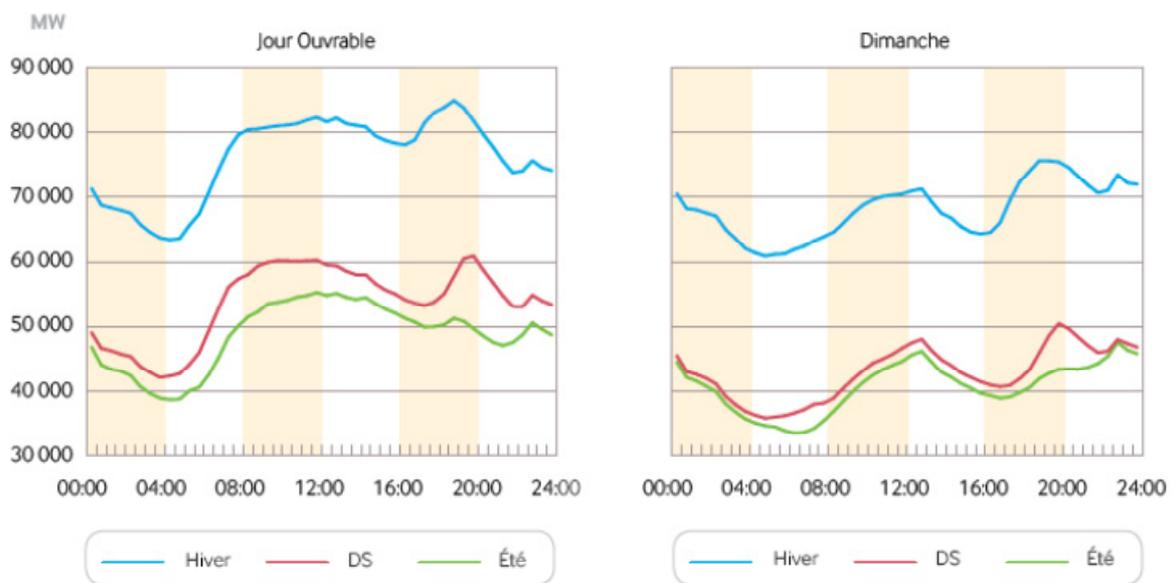


Figure 1-2 – Evolution et prévisions de la puissance à la pointe

Selon le rapport du groupe de travail sur la maîtrise de la pointe électrique [Poignant & Sido, 2010] il existe plusieurs types de pointes électriques.

Premièrement, on a la pointe saisonnière, en France, où la consommation électrique est très sensible à la température, en partie due au chauffage électrique. Ce type de pointe explique les écarts entre les courbes-types journalières d'hiver et été de la Figure 1-3.

Ensuite, nous avons les pointes synchrones nationales qui se produisent, en hiver, vers 19 heures et le matin au moment d'ouverture des commerces et bureaux (Figure 1-3). La pointe de 19 heures correspond au moment où la consommation nationale est la plus importante. Elle est due au retour à la maison après le travail et à la mise en marche de plusieurs équipements électriques comme l'éclairage, la télévision, la cuisinière, et autres, tandis que les activités économiques n'ont pas cessé. En été la pointe se trouve normalement vers 13 heures mais son importance est beaucoup plus faible qu'en hiver.



Source: [RTE, 2011]

Figure 1-3 – Courbes de charge de journées-typiques

La Figure 1-3 montre les différences entre les courbes de charge des journées-typiques, en hiver, demi-saison (DS) et été, pour des jours ouvrables et pour un dimanche. On observe qu'il existe une consommation presque constante entre 8 heures et 15/16 heures pour les jours ouvrables, suivi d'une petite réduction entre 16 et 18 heures pour ensuite augmenter beaucoup (en hiver). Cependant la nuit il existe une consommation beaucoup plus faible.

Ainsi l'objectif du contrôle des usages électriques pourrait être de déplacer la consommation soit vers la nuit, ou par exemple de déplacer une partie de l'énergie du pic de 19 heures vers le creux de 16 à 18 heures (« Valley Filling ») ou vers la nuit, ce qui est plus difficile.

Après cet aperçu macroscopique des consommations et des pointes électriques, on va maintenant se focaliser sur les caractéristiques des différents usages.

1.1.1. Chauffage électrique

Le chauffage électrique (pompes à chaleur incluses) représente un quart de la consommation totale électrique résidentielle et ce secteur est un des gros responsables de la pointe saisonnière pendant l'hiver, où la sensibilité du système électrique approche les 2 300 MW/°C [RTE, 2011], i.e. pour chaque réduction d'un degré Celsius de la température extérieure, il faut injecter dans le réseau électrique 2 300 MW. De plus, actuellement les systèmes de chauffage électrique sont présents dans 7 millions de logements principaux, pour un totale d'environ 25 millions, ce qui représente 9% de la consommation nationale d'électricité [EDF, 2005].

Pour comprendre les modes d'opération et de régulation des différents systèmes de chauffage, nous allons présenter la description du fonctionnement des principaux équipements et puis faire une analyse sur les caractéristiques d'usage et sur les évolutions technologiques.

1.1.1.1. Description des systèmes de chauffage

Le système le plus répandu dans les logements résidentiels français est le chauffage électrique à effet Joule. Cependant il existe plusieurs types d'émetteurs. Une description des différents émetteurs est faite ci-dessous. Les pompes à chaleur sont aussi décrites car ces systèmes sont de plus en plus vendus et leur développement est renforcé par les nouvelles réglementations thermiques.

1.1.1.1.1. Convecteur électrique

Le principe de cet appareil est : faire entrer l'air froid en bas et ensuite le chauffer avec une résistance électrique (Figure 1-4). Finalement l'air va sortir par la partie supérieure du convecteur (« Grille à ailettes » - Figure 1-1). La lecture de la température de l'air se fait par une sonde et le contrôle de la température est fait par un thermostat soit mécanique (Bilame, bulbe, tension de vapeur) soit par un thermostat électronique (PI ou PID). Les appareils plus récents sont, presque tous, équipés de thermostats électroniques.

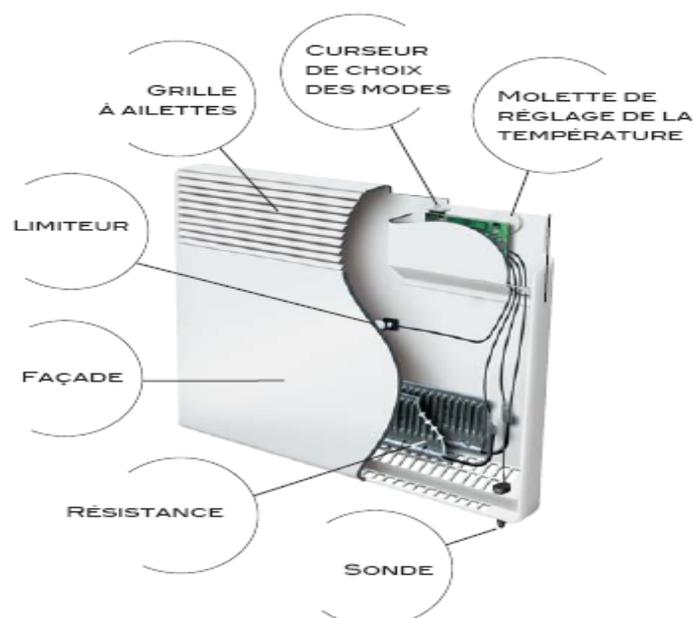


Figure 1-4 - Convecteur électrique [Modèle F18 multiforme - Catalogue Atlantic]

La partie radiative d'un convecteur électrique est d'environ de 5 à 10 % (part arrière comprise) [Bézian et al., 1997]. Le poids maximal de ses systèmes peut aller jusqu'à 8 kg.

L'utilisateur pourra ajuster la température de la pièce en modifiant soit la position du thermostat dans le boîtier, soit en modifiant le mode de fonctionnement. Les modes de fonctionnement existants généralement sont :

- Confort : Programme utilisé pendant les heures d'occupation ;
- Eco : Programme utilisé pendant les heures d'inoccupation, soit 2-4 °C de moins que la fonction confort ;
- Hors-gel : Programme où le thermostat est modifié pour une température de consigne d'environ 7°C ;
- Arrêt : le chauffage est éteint.

Chaque équipement peut chauffer efficacement des pièces de 15-20 m² où le plafond n'est pas très haut. A cause de leur forte émission de chaleur par convection ces systèmes entraînent une plus grande stratification que les autres systèmes, i.e. la température augmente avec la hauteur jusqu'à 1.2°C par mètre dans les bâtiment anciens et 0.5°C dans les bâtiment bien isolés [Bézian et al., 1997]. Les puissances de chauffage vont généralement de 750 jusqu'à 2000 Watt.

Ces équipements peuvent aussi être contrôlés par une unité centrale ou ils peuvent avoir programmation hebdomadaire embarquée. La communication avec l'unité centrale est faite normalement par fil pilote (courant porteur) ou par wifi.

1.1.1.1.2. Panneau Rayonnant

Il existe deux types de systèmes rayonnants : Ouverts et Fermés.

Systèmes Ouverts : Ce type de chauffage est constitué par un corps de chauffe et par une grille alvéolée, pour protection, et il libère une grande partie de la chaleur par rayonnement (environ 40% selon [Bézian et al., 1997]). Selon la norme NFC 79-251 la température de la grille ne doit pas dépasser 90°C.

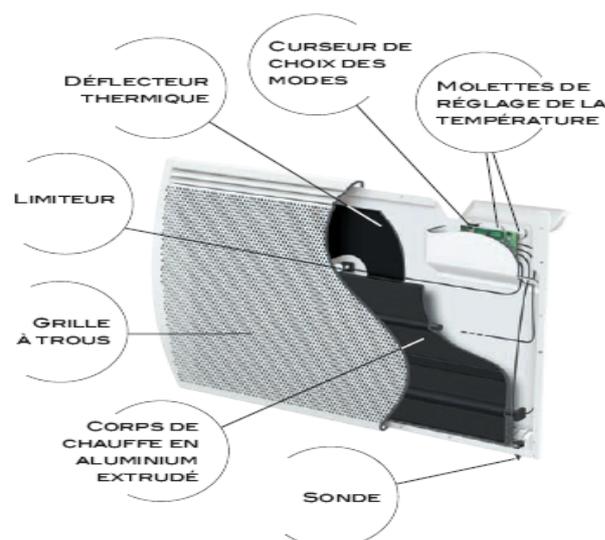


Figure 1-5 – Panneau rayonnant ouvert [Modèle Tatou – Catalogue Atlantic]

Systèmes Fermés : Le chauffage est constitué par résistances thermiques que ne sont pas visibles, i.e. les résistances sont enfermés dans l'enveloppe de l'équipement. La norme NFC 79-251 définit que l'écart de température entre la surface extérieure et la température ambiante ne doit pas dépasser 70°C. Leur inertie (masse totale se trouve entre 7 et 20 Kg) est un petit peu plus supérieure aux systèmes par convection.

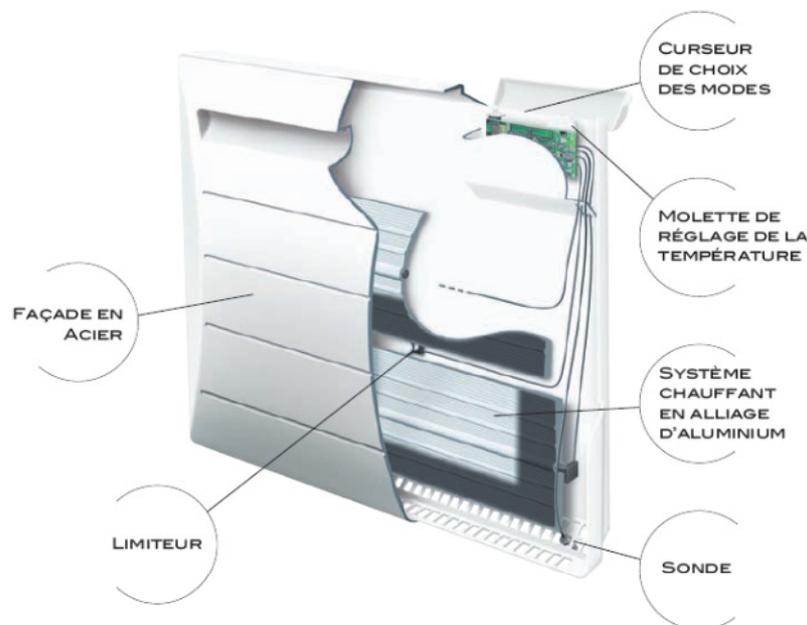


Figure 1-6 - Panneau rayonnant Fermé [Modèle Shangai 2 – Catalogue Atlantic]

Chaque appareil a un limiteur pour ne laisser pas la température de la surface dépasser les limites fixées par la norme NFC 79-251. Le contrôle de la température est fait avec par un thermostat (électronique ou mécanique) avec une sonde que peut être positionnée à l'arrière (dehors) de l'équipement ou en bas de l'appareil comme montré dans les Figures 1-5 et 1-6.

L'utilisateur peut réguler la consigne en modifiant soit le mode de fonctionnement (Confort, Eco, Hors-gel), soit la position du thermostat dans le boîtier de l'appareil.

1.1.1.1.3. Régulateurs centraux des chauffages électriques (convecteurs et radiateurs)

Les systèmes centraux (contrôle des différents chauffages à partir d'un seul appareil) commercialisées aujourd'hui ont une large variété. Ces appareils peuvent communiquer avec les différents équipements de chauffage par divers modes :

- Fil pilote
- Courant Porteur
- Radio Fréquence

Dans les contrôleurs centraux utilisés dans les systèmes avec chaudière et réseaux d'eau, la chaleur dégagée est généralement fonction de la température d'une seule pièce ou de la température extérieure. Les contrôleurs centraux des chauffages électriques dans le marché donnent directement à chaque appareil de chauffage la « consigne » à utiliser. Ce signal correspond à la consigne du thermostat implémenté dans l'appareil (position du thermostat décrit dans les sections précédentes).

La programmation des chauffages est normalement faite, avec un pas d'une heure, pour les 7 jours de la semaine selon les besoins de l'utilisateur. Le mode d'opération de ces contrôleurs peut être décidé à partir d'une action directe sur la boîte de commande.

Les principaux fabricants de chauffages électriques offrent aussi la possibilité d'une installation de délesteurs ampérométriques pour le chauffage ambiant et de l'eau chaude sanitaire. Sa fonction est de couper le chauffage et/ou l'ECS quand la puissance souscrite est dépassée mais aussi ajuster le fonctionnement de ces systèmes en fonction du type de tarif choisi (Option H.C/H.P ou Tempo – EDF).

1.1.1.1.4. Chauffage à accumulation

Ces systèmes de chauffage permettent de stocker des grandes quantités d'énergie du fait qu'ils sont constitués par des briques réfractaires de haute densité ou du granit broyé ou de la lave...

Ces matériaux permettent de stocker la chaleur dans les heures où le tarif électrique est bas (heures creuses) et n'ont pas besoin d'être chauffés pendant les heures pleines, en même temps qu'ils continuent à libérer de la chaleur.

Il existe deux types de radiateurs par accumulation : statique compensé et dynamique (Figure 1-7).

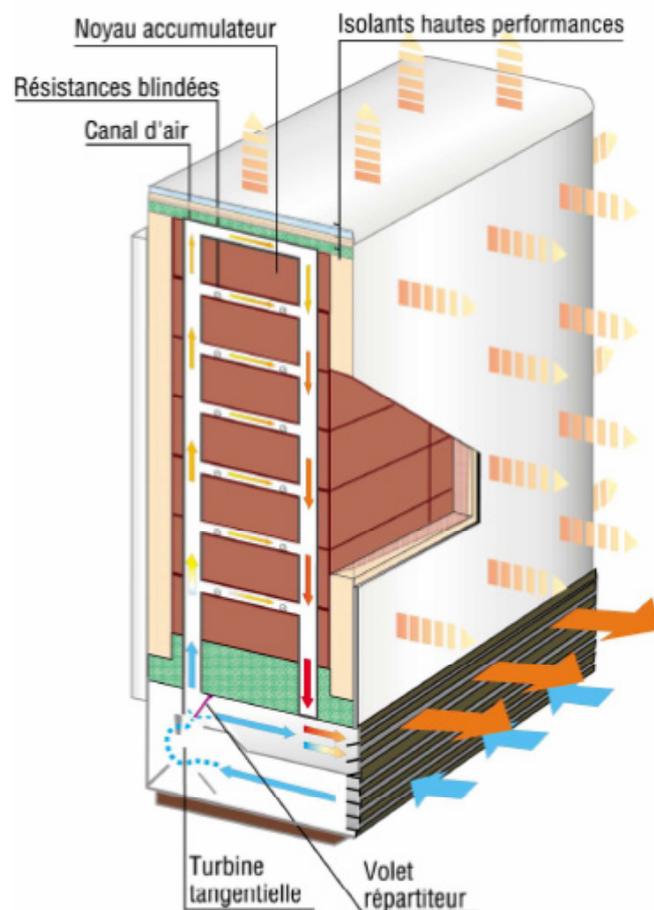


Figure 1-7 - Chauffage électrique par accumulation dynamique [Modèle Airelec Accutop série 2 – Catalogue Atlantic]

- **Appareil de chauffage à accumulation statique**

Ces appareils accumulent la chaleur pendant les heures creuses et le dégagement de chaleur est uniquement statique (rayonnement), non réglable. Cette à dire que il n'existe pas de contrôle sur la quantité de chaleur libéré par rayonnement pendant la journée.

- **Appareil de chauffage à accumulation dynamique**

Dans ce type d'appareils, on a aussi un dégagement de chaleur par rayonnement mais on a aussi un ventilateur qui est installé dans la partie inférieure. Ce ventilateur permet un meilleur contrôle de la température de la pièce par diffusion de l'air. L'air froid entre en bas et après le ventilateur, à vitesse variable, force l'air à passer dans le noyau accumulateur et ensuite l'air chauffé est libéré dans la pièce. La position de la sonde du thermostat est généralement comme dans le cas des panneaux rayonnants, i.e. la sonde est positionnée à l'arrière (dehors) de l'équipement ou en bas de l'appareil comme montré dans les Figures 1-5 et 1-6.

L'utilisateur pourra réguler la consigne du thermostat et le bouton marche /arrêt du ventilateur.

1.1.1.1.5. Pompes à chaleur

Dans les pompes à chaleur (PAC) électriques à compression mécanique de vapeur, l'efficacité est très variable avec la température de la source de chaleur et avec la température du circuit de chauffage.

Plus l'écart entre les températures des sources est important, plus l'écart entre les températures d'évaporation et de condensation sera important. Dans ces conditions, le taux de compression augmente également et par conséquent, plus grand est le ratio de pression, plus le compresseur a besoin d'énergie pour fournir la même puissance calorifique et donc plus le COP sera faible. Pour cela ces équipements sont parfois utilisés avec des sources de chaleur qui permettent une température plus haute et stable (Figure 1-8).

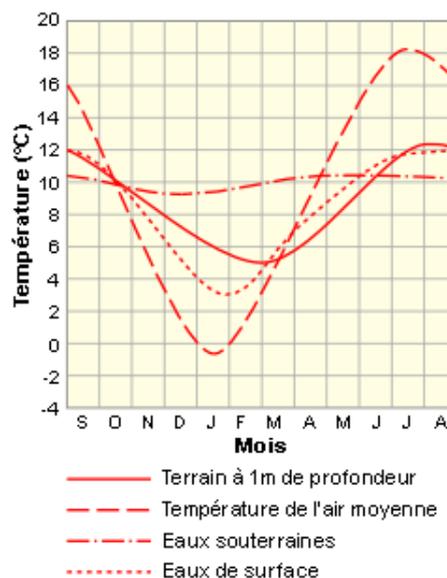


Figure 1-8- Températures de différentes sources

Les pompes à chaleur à compression de vapeur ont une température maximale de chauffage de 55 à 65 °C (seulement quelques machines), pour cela les radiateurs utilisés sont normalement surdimensionnés pour pouvoir libérer la quantité de chaleur demandée par la pièce. Les pompes à chaleur sont préférablement utilisées avec plafonds et planchers chauffants avec une température maximale de départ d'eau de 35 °C.

Il y a plusieurs types de PAC en fonction des sources et des vecteurs d'énergie (l'air ou l'eau). On présente ci-dessous la description pour les PAC Air/Eau, car ce type de PAC représente la majorité des modèles installés en France.

Une PAC Air/Eau peut être installée pour le chauffage (il existe des installations avec et sans ballon de stockage, suivant l'inertie de la boucle d'eau du système de chauffage) ou pour le chauffage et l'ECS (avec ballon de stockage). Elles sont moins chères que les autres types de PAC sur l'eau, mais elles ont un COP inférieur à cause des températures plus basses de la source de chaleur et parce qu'elles ont besoin d'un système de dégivrage (parfois ces systèmes sont aussi équipés de résistances électriques à effet Joule).

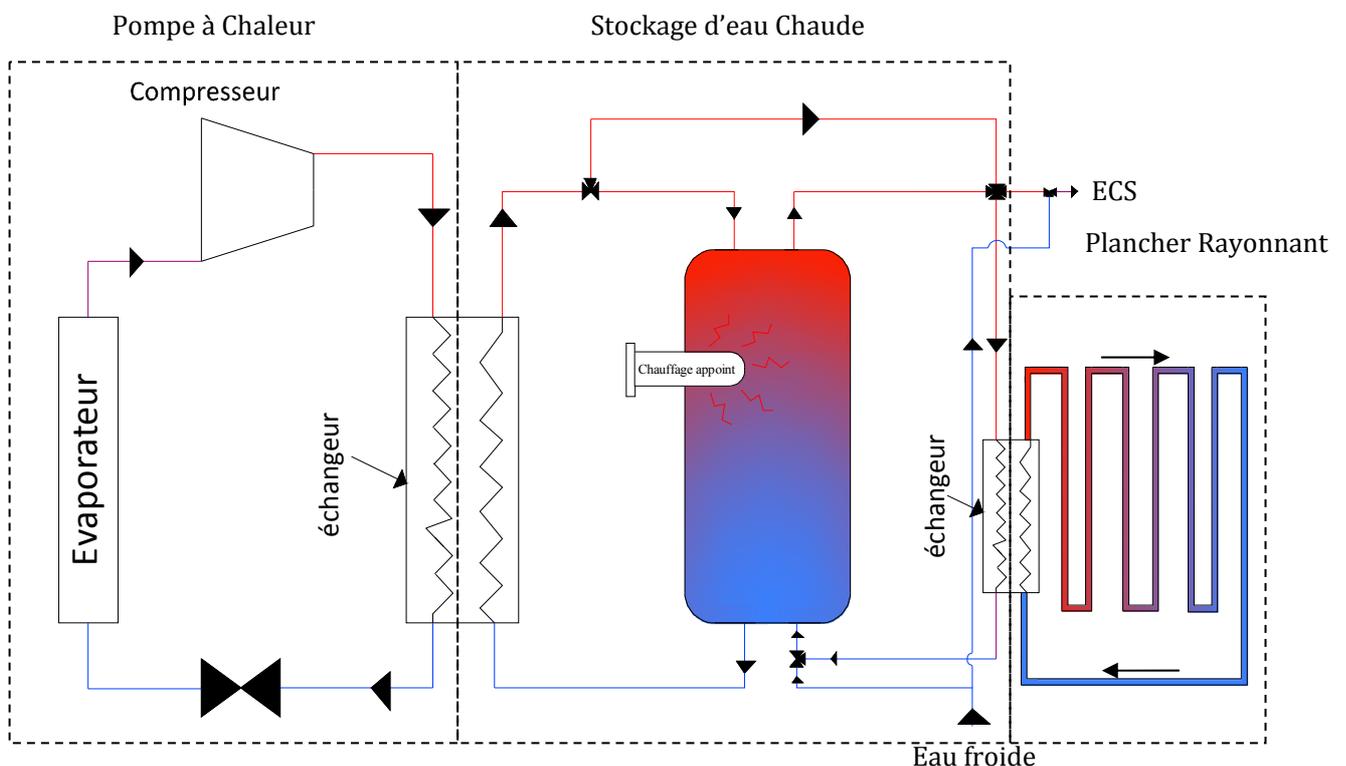


Figure 1-9- Schéma d'une pompe à chaleur Air/Eau pour chauffage et la production d'ECS

La puissance de ces PAC est dans la plupart des cas dimensionnée, pour couvrir les besoins de chaleur quand la température extérieure descend jusqu'à 0 °C (température d'équilibre – température pour laquelle la pompe couvre encore l'ensemble des besoins). Pour des températures plus basses, on utilise un chauffage d'appoint avec un mode de fonctionnement comme décrit ci-dessous.

Pour ces types de PAC, il existe 3 types principaux de fonctionnement possibles [H. Recknagel, 2005]:

- i. *Fonctionnement monovalent* : la PAC est dimensionnée pour couvrir tous les besoins de chaleur. Ce type de fonctionnement n'est pas utilisé dans les climats froids car le coût d'investissement serait trop élevé.
- ii. *Fonctionnement bivalent alternatif* : les besoins énergétiques annuels se répartissent 50/50 % entre le chauffage d'appoint et la pompe à chaleur. Les deux systèmes ne fonctionnent jamais en même temps.

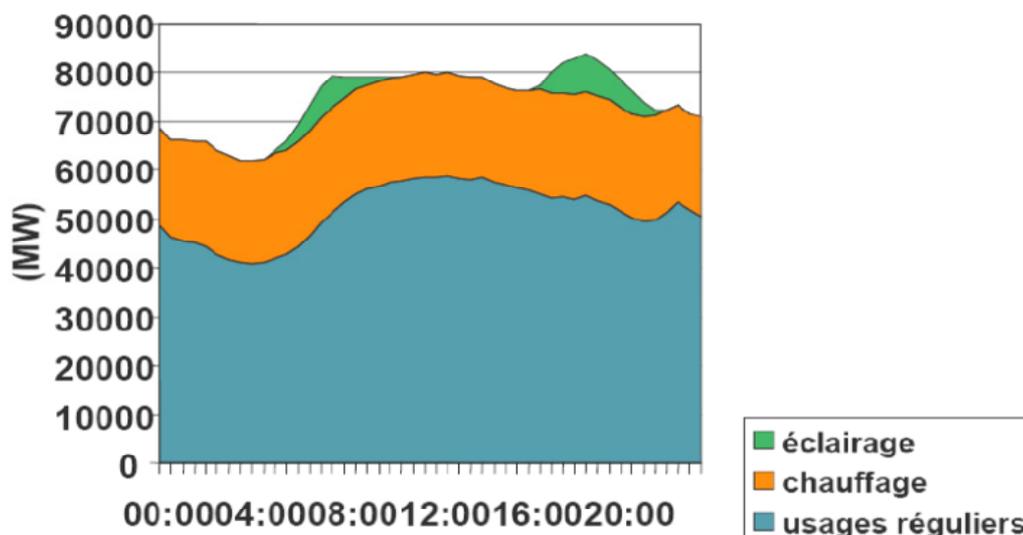
La puissance de la chaudière doit être dimensionnée pour les besoins calorifiques maximaux. Celle de la PAC est dimensionnée pour couvrir environ la moitié de la puissance maximale.

- iii. *Fonctionnement bivalent parallèle* : Dans ce cas les besoins énergétiques annuels sont couverts à moins de 20 % par le chauffage d'appoint et le restant étant couvert par la PAC. Les puissances choisies restent les mêmes que dans le cas précédent. Comme pour les températures inférieures au point d'équilibre les deux systèmes fonctionnent en parallèle, la température aller de la chaudière doit être bien réglée avec la pompe de chaleur. Pour les chaudières, le montage se fait normalement en parallèle car c'est la façon plus efficace de tirer pleinement partie de la pompe de chaleur comme principal système chauffant.

La température de la boucle d'eau est fixée par une loi d'eau, en fonction de la température extérieure. Les nouveaux systèmes incluent aussi un thermostat contrôlé par la température d'une pièce de référence. La régulation locale (dans chaque pièce) est assurée par des vannes thermostatiques.

1.1.1.2. Caractéristiques d'usage et évolutions technologiques futures

En termes d'utilisation, le chauffage électrique reste un équipement avec un usage presque continu (pendant la saison froide) avec de petites intermittences (passage en mode ECO pendant la nuit ou en absence de l'utilisateur) pour les chauffages avec programmateur. D'après la Figure 1-10 [Poignant & Sido, 2010] la consommation du chauffage reste presque continue toute au long de la journée.



Source : [Poignant & Sido, 2010]

Figure 1-10 - Profil de consommation en puissance (MW) au cours d'une journée d'hiver décomposé selon différents usages

Un contrôle effectué sur ces systèmes aura un impact à n'importe quelle heure de la journée, et la puissance effacée ou réduite va dépendre principalement de la température extérieure.

Les constructions et les rénovations continuent d'augmenter, même si leur nombre reste faible, avec 290 000 de maisons neuves et 350 000 rénovations par an respectivement [Traisnel, 2001] [ADEME, 2009].

La nouvelle réglementation thermique (RT) des bâtiments, RT 2012 [ADEME, 2011], va faire diminuer les besoins de chauffage d'environ 50 % par rapport à l'ancienne réglementation (RT 2005). Une autre caractéristique de la nouvelle RT, c'est que les systèmes de chauffage électrique conventionnel (effet Joule) seront remplacés par des systèmes plus performants en termes d'énergie primaire, comme les pompes à chaleur ou par des chaudières gaz à condensation dans les nouvelles constructions.

L'introduction des pompes à chaleur introduira certainement une réduction des consommations électriques, mais leur rendement est grandement affecté lors des vagues de froid car il est très dépendant de la température extérieure. De plus, pour des températures très basses les PAC ont besoin d'un système d'appoint (souvent électrique à effet Joule – moins cher). Dans le cas des PAC hybrides avec chaudière gaz, ces problèmes de pointe ne se posent pas, mais le coût de ces systèmes reste encore élevé.

Un autre problème dû au fonctionnement des PAC peut apparaître lors du démarrage des compresseurs (pour les compresseurs sans « *soft-start* ») qui peut créer des pics de puissance 5 à 7 fois la puissance électrique nominale et créer des chutes de tension instantanées dans les réseaux de distribution déjà contraints.

Même en prenant en compte les rénovations, la construction des habitations neuves et l'installation des pompes à chaleur au détriment des chauffages à effet Joule dans les années prochaines, la consommation électrique continuera à augmenter [RTE, 2011] et possiblement le problème des pointes électriques lors des vagues de froid subsistera.

Du fait de la grande dissémination du chauffage électrique à effet Joule dans le parc français, dans les années à venir, ce système restera un équipement ayant un impact majeur sur la consommation et sur les pointes électriques.

1.1.2. Eau Chaude Sanitaire (ECS)

L'eau chaude sanitaire, représente environ 13 % de la consommation d'électricité dans le secteur résidentiel. Ci-dessous, on présente la description du fonctionnement de ces systèmes.

1.1.2.1. Description des systèmes d'ECS électriques à hydroaccumulation

Les systèmes d'ECS à accumulation, peuvent être composés d'un cylindre vertical ou horizontal. L'eau est chauffée par une résistance électrique. Cette résistance est généralement située au centre d'un cylindre vertical, mais le cylindre peut aussi avoir des résistances disposées à l'horizontale ou même avoir plusieurs résistances. Avec l'échauffement, on a un effet de stratification (Convection), c'est à dire que l'eau chaude monte et l'eau plus froide reste en bas. Pour cela l'eau chaude est retirée de la partie supérieure et l'eau froide entre par la partie inférieure du réservoir (Figure 1-12). La

température de consigne utilisée est normalement comprise entre 60 à 65°C et elle est contrôlée par un thermostat.

Dans la Figure 1-11 suivant on peut voir que dans un premier temps (« temps 1 ») le réservoir a une température homogène. Les points 2 et 3 correspondent à deux puisages et les points 4 et 5 correspondent à la récupération (chauffage après le puisage), quand la résistance est allumée par le thermostat.

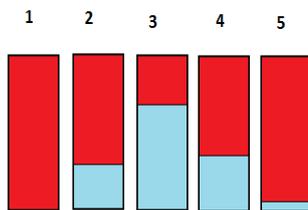


Figure 1-11 - phénomène de stratification pendant le fonctionnement de l'équipement

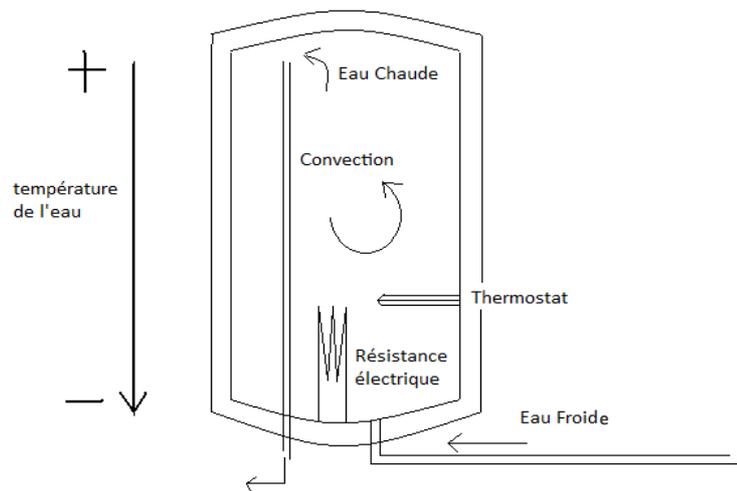


Figure 1-12- Schéma d'un équipement à Hydroaccumulation classique

La chaleur apportée peut être aussi produite, dans les nouveaux modèles, par un cycle thermodynamique (ballon thermodynamique ou PAC), où au lieu de la résistance, c'est un échangeur qui est responsable de l'apport de chaleur.

1.1.2.2. Caractéristiques d'usage et de évolutions technologiques futures

Le choix d'un système d'ECS à hydroaccumulation dépend généralement des types d'équipements déjà installés dans le bâtiment. Par exemple si on a seulement comme consommateurs d'électricité des petits appareils, le choix d'un système électrique d'ECS à hydroaccumulation avec relance nocturne ne va pas modifier la puissance souscrite. Mais, si on ajoute le chauffage électrique ça peut faire augmenter la puissance électrique souscrite et les utilisateurs choisiront peut-être un autre type d'équipement pour l'ECS [Orphelin & Adnot, 1999].

A cause de sa capacité de stockage (cas de l'ECS hydroaccumulation) et des expériences déjà menées sur le contrôle de ces appareils, environ 90% des ECS à hydroaccumulation (Volume > 50 litres), en France, sont chauffés seulement pendant la nuit après réception d'un signal du réseau [Stamminger, 2009]. Selon l'étude menée par Wilma Mert [Mert, 2008] l'acceptation des utilisateurs en Europe pour une régulation à distance de ces équipements est de 88 à 94 % si le confort n'est pas affecté.

Les politiques énergétiques françaises et européennes pourraient interdire le fonctionnement des chauffe-eau à accumulation classiques, en les remplaçant par des chauffe-eau thermodynamiques ou par des pompes à chaleur, voir des chauffe-eau solaires. A part ces derniers la production continuera

à se faire aux heures creuses car la capacité de stockage reste inaltérée, sinon un simple contrôleur permettra de réaliser au moins un décalage des heures de chauffage vers les heures creuses.

1.1.3. Cuisson

La cuisson représente 7 % de la consommation électrique résidentielle, mais du aux grands appels de puissance des appareils de cuisson et à cause d'un usage pendant les heures de pointe (Pointes en hiver, ~19 heures), sa contribution pendant les pics de consommation devient plus importante. Toutefois, le contrôle des équipements de cuisson est plus sensible que pour le cas d'ECS, car les consommateurs sont très sensibles à des changements de leurs habitudes/confort.

1.1.4. Electroménager Froid et Lavage

En France, les équipements de lavage et froid représentent à peu près 21% de la consommation électrique résidentielle. Ces usages comprennent plusieurs appareils : Machines à laver, lave-vaisselle, sèche-linge, réfrigérateurs et congélateurs.

Ci-après on fait la description du fonctionnement de ces différents équipements et on décrit leurs caractéristiques d'usage et les évolutions technologiques futures.

1.1.4.1. Machines à laver

Les machines à laver les plus usuelles en Europe sont des machines avec un tambour rotatif à axe horizontal. Il y a plusieurs capacités de 3 kg jusqu'à environ 11 kg, cependant les plus usuelles ce sont les machines de 5 et 6 kg [EuPLot14, 2007]. Le fonctionnement de ces appareils est fait dans une première étape par l'entrée d'eau et du détergent pour humidifier le linge. Puis, l'eau est chauffée en simultané avec le démarrage de la phase de lavage. Le temps de chauffage va dépendre de la puissance de l'élément chauffant de la machine (Résistance) et de la température choisie par l'utilisateur. La puissance de la résistance peut varier entre 1800 W et 2500 W.

Quand la température désirée est atteinte, la résistance s'éteint et le lavage continue encore un certain temps. La partie « Lavage » consiste en plusieurs passages d'eau avec détergent et rinçages consécutifs couplés avec le mouvement rotatif du tambour. Parfois après un certain temps la température baisse en-dessous de la limite fixée par le thermostat (cette limite dépend du type de thermostat utilisée) la résistance peut être rallumée. Généralement, les machines dites de « gamme basse » et « gamme moyenne » sont équipées de thermostat mécanique ON/OFF avec une précision d'environ 6°C et les machines plus efficaces sont normalement équipées de thermostat électronique (PID) qui permettent une précision de 1°C.

A la fin de la partie de lavage, le linge passe par plusieurs (3 ou 4 généralement) rinçages avec l'eau froide, où normalement à la fin de chaque rinçage le linge passe par un petit essorage. L'assouplissant est appliqué dans le dernier rinçage.

Une fois finie la phase de rinçage, le linge passe par un essorage, où le tambour va tourner à grande vitesse (400 – 1600 rpm) et ainsi retirer l'eau du linge.

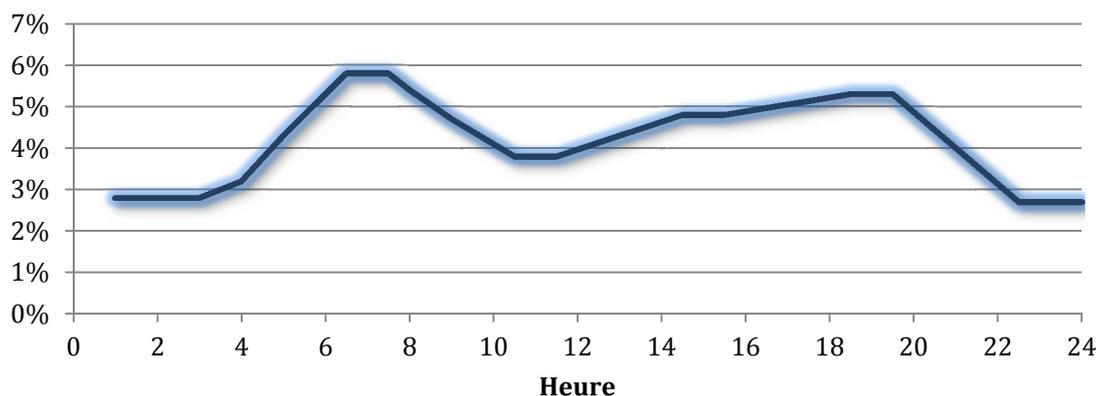
Tout ce processus peut être contrôlé soit par un contrôleur électronique, soit par une horloge (« Timer ») mécanique et il peut prendre entre 15 min à 3 heures.

L'énergie utilisée pendant tout le cycle est due principalement au chauffage d'eau, selon l'étude menée par le Group for Efficient Appliances [GEA, 1995a], cette énergie représente environ 80 % de l'énergie totale consommée.

Les études Ecodesign Lot 14 et autres montrent qu'il y a une tendance des utilisateurs, dans les dernières années, pour le choix des programmes à basse température, i.e. programmes de 30 et 40°C, dû à des développements des détergents à basses températures. Selon l'étude EuP Lot 14, les consommateurs utilisent dans 36.7% des cas un programme à 40°C, contre 22.8% à 60°C.

Le démarrage de la machine peut se faire de deux manières différentes soit par démarrage immédiat soit par démarrage différé. Selon l'étude Ecodesign Lot 14, 32 % des machines en Europe ont cette option et 42% en France.

Malgré les tarifs HC/HP les machines à laver ont une grande probabilité d'usage pendant les heures où les pics de puissance globale sont les plus forts, le matin 7-8 heures et le fin de l'après midi 18-20 heures (Figure 1-13). C'est-à-dire que l'impact des lave-linge sur les pics de consommation est augmenté par le comportement des usagers. Selon l'étude Ecodesign Lot 14, 30% des machines en Europe sont équipées de dispositifs de départ différé, mais en moyenne 40 % des utilisateurs qui possèdent ce dispositif ne l'utilisent jamais.



Source: [Stamminger, 2009]

Figure 1-13 – Probabilité du départ d'un cycle de lavage en France

Sachant que la puissance nominale des machines à laver se trouve entre 1800 et 2500 Watt, cet équipement peut avoir un impact important sur la courbe de charge aux heures de pointe (matin et fin d'après-midi).

Les directives européennes et les études d'éco-conception [EuPLot14, 2007] vont faire diminuer les consommations des nouveaux appareils qui entrent dans le marché européen. L'utilisation des détergents de plus en plus puissants a permis de réaliser des cycles de lavage à des températures de plus en plus basses. Donc, l'impact unitaire d'un contrôle de ces appareils dans la courbe de charge est devenu plus faible, mais si une grande partie du marché peut être contrôlé, le potentiel d'effacement pourra être plus important.

1.1.4.2. Lave-vaisselle

Un lave vaisselle est un équipement où la vaisselle peut être mise sur deux étagères, habituellement mobiles. Il peut y en avoir de différentes tailles, normalement mesurées par le nombre de couverts, de 4 à 15 couverts. Les plus usuelles sont 12, 9 et 15 respectivement [EuPLot14, 2007].

Le fonctionnement d'un lave vaisselle se caractérise selon une étude menée par le GEA [GEA, 1995a] et par une étude menée par Stamminger [Stamminger, 2009] par 5 phases :

1. **Pré-rinçage (à froid)** – la vaisselle est aspergée avec l'eau froide.
2. **Lavage** – la vaisselle est aspergée par l'eau chaude. L'eau est chauffée jusqu'à la température choisie par l'utilisateur (normalement 50/55°C, 60/65°C ou 70/75°C) par une résistance électrique avec une puissance entre 1800 et 2500 W de puissance. Quand la température désirée est atteinte la résistance s'arrête mais le cycle de lavage peut continuer pendant un certain temps (la température va baisser à un rythme d'environ 0.3 °C/min).
3. **Rinçage (à froid)** - la vaisselle est aspergée avec de l'eau froide.
4. **Rinçage (chaud)** – L'eau est réchauffée à une température un peu au-dessus de la température de lavage pour stocker une chaleur suffisante, sur la vaisselle, pour la phase de séchage.
5. **Séchage** – il y a 3 formes principales de séchage dans les machines actuelles :
 - 5.1. Séchage par *condensation sans source de chaleur supplémentaire (présent dans 45% des machines)* :
La vaisselle sèche naturellement au fur à mesure que le vapeur d'eau condense sur les parois intérieures de la machine.
 - 5.2. *Séchage par Condensation avec réservoir d'eau froide (présent dans 25% des machines)* :
Système identique au précédent mais où il y a un réservoir autour des parois intérieures de la machine qui lors du séchage est remplie d'eau froide accélérant ainsi le processus de condensation.
 - 5.3. *Séchage par condensation avec ventilateur (présent dans 25% des machines)*
Système aussi identique au premier mode de séchage décrit mais où un ventilateur accélère le séchage (condensation de l'eau) de la vaisselle, normalement appelé séchage Turbo.

Le contrôle du processus de lavage est fait par un contrôle électronique ou mécanique. Le cycle de lavage peut avoir une durée de 15 minutes jusqu'à 3 heures selon le programme choisi et la température. Cependant le cycle de lavage utilisé pour déterminer les différentes classes énergétiques a une durée d'environ 140 minutes [EuPLot14, 2007].

La température est contrôlée soit par un thermostat mécanique on/off soit par un thermostat électronique.

Les lave-vaisselle sont utilisés normalement après le dîner vers 20:00 (en France), ce qui est concomitant avec les pointes journalières d'hiver. Environ 30 % des machines ont un système de départ différé, mais seulement 20 % des utilisateurs l'utilisent souvent [Stamminger, 2009].

1.1.4.3. Sèche linge

Le sèche-linge est un électroménager qui permet le séchage du linge à travers l'extraction de l'humidité présente dans le linge, normalement après un lavage. Le contrôle de la durée du cycle de séchage est régulé soit par une horloge avec une durée prédéterminée soit par un capteur qui mesure l'humidité du linge.

Les sèche-linge sont présents dans 35 % des habitations en France et selon Stamminger [Stamminger, 2009], 32% des machines sont équipées d'une option pour permettre le départ différé. Il existe un facteur saisonnier en termes d'usage et en moyenne 3,6 séchages sont effectués par semaine en hiver contre 2.3 en été. Les heures de démarrage sont corrélées avec les cycles des machines à laver, donc le pic d'utilisation se trouve en début de matinée et le soir après l'utilisation des machines à laver.

L'extraction de l'humidité peut se faire de plusieurs manières selon le type de machine. Ci-dessous est présentée une description du mode de fonctionnement de différentes machines selon l'étude Ecodesign Lot 16 [EuPLot16, 2009] :

- **Machines à évacuation**

Ce type de machine est le plus usuel et le plus simple (49 % des modèles en France). Le principe c'est de chauffer l'air avec une résistance électrique (Puissance entre 2000 et 2500 W) et le faire passer ensuite sur le linge. L'air humide passe par un filtre et ensuite il est soufflé vers l'atmosphère.

- **Machines avec condensation**

Ce type de machine représente 30% des modèles en France. Ces machines ont le même principe que les machines à évacuation mais au lieu de souffler l'air à l'atmosphère, elles font passer l'air chaud (chargé d'humidité) par un échangeur. Dans cet échangeur l'air chaud va transférer la chaleur à l'air froid en entrée et l'eau condensée est récupérée dans un réservoir. Cette machine permet ainsi de réaliser un préchauffage de l'air d'entrée avant de traverser la résistance électrique. A cause de ces deux flux d'air ces appareils sont équipés avec deux ventilateurs, un ventilateur pour forcer l'air extérieur vers le tambour et un autre pour forcer l'air sur le tambour vers le condenseur.

- **Machines avec condensation + PAC³**

Ce sont les machines les plus efficaces et elles utilisent une PAC. Le principe de séchage est le même que dans une machine à condensation mais la grande différence se trouve dans le mode de chauffage de l'air et de récupération de la chaleur. La chaleur du fluide frigorigène (côté condenseur) est transférée au l'air d'entrée à travers un échangeur air-air. La chaleur restant dans l'air humide est récupérée par un autre échangeur de chaleur couplé à l'évaporateur de la pompe à chaleur.

³ Pour savoir plus sur le mode de fonctionnement des PAC voir section 1.1.1.1.5.

La consommation de ces équipements reste élevée avec 2-3 kWh par cycle. Dans le futur, à cause de plusieurs politiques énergétiques (labels, directives européennes...), cette consommation va pouvoir être réduite de 50 %.

1.1.4.4. Réfrigérateurs

Relativement aux équipements de froid, leur fonctionnement est régi par un cycle thermodynamique contrôlé par un thermostat mécanique ou électronique. Dans des conditions normales le compresseur fonctionne pendant seulement 20-35 % du temps, mais quand la porte est ouverte très fréquemment ou une grande quantité de nouveaux items sont chargés, pour pouvoir maintenir la bonne température à l'intérieur du réfrigérateur, le compresseur peut travailler en continu pendant quelques heures. La capacité de stocker du froid, pour effectuer des effacements par exemple, va dépendre grandement de la quantité de produits chargés.

Les appels de puissance deviennent plus importants entre 18 et 20 heures à cause de l'ouverture fréquente de la porte, liée à la préparation des repas.

La puissance de ces équipements reste faible, entre 50 et 300 Watt, mais le taux de pénétration du marché en Europe est supérieur à 100 % [EuPLot13, 2007], donc il y a un potentiel en termes d'agrégation.

1.1.5. Climatisation

La climatisation résidentielle représente seulement 1 % des consommations car elle n'est pas très développée en France métropolitaine. Il y a plusieurs systèmes de climatisation résidentielle. Cependant, on va examiner seulement les climatiseurs individuels car ce sont les systèmes les plus répandus en France.

Les climatiseurs individuels sont régis par un cycle thermodynamique qui lui permet de rafraîchir le bâtiment pendant les jours chauds. Leur utilisation principale est ainsi faite pendant l'été, où le système électrique est moins chargé. Cependant au niveau local, comme en région PACA, leur contrôle peut devenir intéressant pour résoudre des problèmes de congestion ou d'urgence (incendies et autres).

Leur rendement (COP – Coefficient of Performance) est dicté par la différence de température entre le bâtiment et l'extérieur. Ces systèmes n'ont pas beaucoup d'inertie, donc comme les systèmes de chauffage c'est l'inertie du bâtiment qui va permettre de pouvoir décaler/arrêter leur fonctionnement sans affecter les utilisateurs.

Leur utilisation est plus importante pendant les après-midi (13-18 heures) où les bâtiments sont déjà chauffés et la température extérieure est à son maximum.

Les climatiseurs sont des équipements avec des grands appels de puissance et avec des consommations non négligeables. Malgré leur faible taux de pénétration dans le marché, leur contrôle restera intéressant au niveau individuel (au niveau d'une maison).

De plus, avec la nouvelle réglementation thermique (RT 2012), les besoins de climatisation seront très faibles et l'installation de ces équipements restera très limitée. Donc l'impact du contrôle des climatiseurs résidentiels reste marginal pour la courbe de charge globale.

1.1.6. Eclairage, Produits gris et bruns et autres équipements

L'éclairage, les produits gris et bruns et les autres équipements (exemples : aspirateurs, centrales vapeur, petit électroménager...) ne sont pas adaptés au contrôle de leur fonctionnement car il sera très difficilement accepté par les consommateurs et ce contrôle va avoir un fort impact sur les habitudes des consommateurs. Les seuls contrôles qui peuvent être implémentés passent par optimisation, voire des possibles réductions de puissance pendant leur fonctionnement. Un exemple de ce type d'optimisation est le contrôle de l'éclairage à partir des détecteurs de présence, ainsi l'éclairage est allumé seulement s'il y a quelqu'un dans la pièce (un couloir par exemple).

Comme on a pu voir dans la Figure 1-10 l'éclairage est un des gros contributeurs de la pointe journalière en hiver, pouvant représenter jusqu'à 6 % de la pointe de 19 à 22 heures. Cependant le déplacement de sa consommation vers une autre heure de la journée reste presque impossible. Néanmoins, il faut aussi dire qu'avec l'interdiction des lampes à incandescence, qui a commencé en 2009, ou aura comme résultat un abaissement des consommations et de la participation aux pointes de 19-22 heures même en prenant en compte l'augmentation du nombre de logements.

1.1.7. Action sur les modes de veille des équipements électriques résidentiels

Un contrôle permettant d'effacer les prises de courant où se trouvent les équipements qui restent en veille, quand les utilisateurs sont absents, permettra d'éliminer ces pertes d'énergie. Le projet REMODECE [Grinden & Feilberg, 2008] a réalisé une campagne de mesures dans 1300 résidences individuelles en Europe. Ils ont trouvé une puissance moyenne totale en veille de 27 Watt par maison et une consommation équivalente de 179 kWh/an. Ainsi la puissance et les économies engendrées restent très faibles pour une automatisation de la coupure et pour une application à large échelle. De plus, en 2010 la commission européenne a mis en place une directive [Commission, 2008] visant la limitation des consommations de veille des équipements électriques avec l'application de seuils de puissance admissibles en mode Off⁴ et Standby¹.

1.2. Analyse de l'aptitude des usages électriques domestiques à la gestion de la demande selon les études existantes

Après l'étude de la consommation, de l'impact sur la courbe de charge électrique et des différentes spécificités de chaque usage résidentiel, on va s'intéresser maintenant aux études existantes sur la gestion de la demande. Cette revue bibliographique et technique permettra de faire l'état de l'art en termes de gestion de la demande des différents usages résidentiels et plus précisément de comprendre la valeur apportée pour le contrôle des équipements électriques et ses effets.

Les études de la gestion de la demande existantes, sont normalement liées à des objectifs spécifiques. Les trois objectifs principaux sont décrits dans les trois paragraphes suivants.

Premièrement, on peut envisager un couplage des équipements avec la production renouvelable électrique. Dans ce cas, il est envisageable d'avoir des équipements avec une capacité de stockage

¹ et ⁴ - Pour plus d'information sur les modes Off et Standby voir 2.3

thermique, pour pouvoir coupler le profil discontinu de production des énergies renouvelables avec l'utilisation des appareils domestiques [Stadler, 2008].

Un autre objectif pourra être l'utilisation des équipements avec des tarifs innovants, représentatifs de l'état d'utilisation du réseau électrique par exemple le « *Real-time-pricing*⁵ » ou le « *Critical peak Pricing*⁶ ». On peut utiliser les systèmes avec stockage thermique mais aussi utiliser des stratégies pour décaler la consommation des heures de pointe pour les heures creuses. Ces types de tarifs auront un impact sur la courbe de charge de manière à aplatir la courbe de charge totale ou les pointes.

Un troisième objectif est le contrôle optimisé du fonctionnement des équipements de façon à limiter la puissance utilisée dans certaines périodes. Normalement les appareils sont commandés par contrôle direct.

Sur cette base, on analyse maintenant les différentes études par équipement électrique.

1.2.1. Chauffage et Climatisation

Le chauffage et la climatisation ont tous les deux un fonctionnement régi par la dynamique du bâtiment (besoins de chauffage et climatisation) et par les conditions météorologiques. Le bâtiment est un système qui échange et participe, indirectement, au fonctionnement de ces équipements en perdant ou en apportant énergie de l'environnement extérieur, mais aussi en stockant l'énergie pendant plus ou moins de temps. Ainsi les stratégies de contrôle étudiées dans la littérature technique du chauffage peuvent (dans certains cas) servir à la climatisation et vice-versa.

Une étude sur l'état de l'art de la gestion de la demande est faite dans l'optique d'analyser les points suivants :

- Analyser les impacts des stratégies de contrôle sur les évolutions de température, de puissance et de consommation.
- Evaluer et comprendre les effets des différentes stratégies de contrôle.
- Identifier le potentiel de contrôle des usages de chauffage et climatisation selon différents perspectives, i.e. économies d'énergie, réduction de la pointe, gestion des usages en fonction de la production renouvelable,...

1.2.1.1. Chauffage électrique

Il y a plusieurs formes de contrôle des systèmes de chauffage électrique, cependant la problématique du contrôle du chauffage électrique est l'évaluation de sa flexibilité.

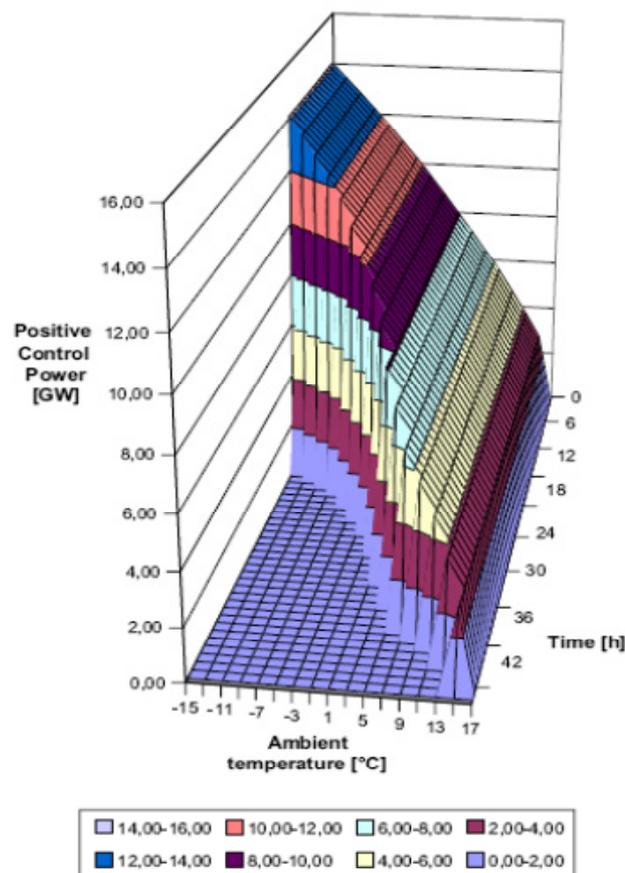
C'est évident que pour des effacements de courte durée (moins de 10 minutes), cette problématique est moins importante, mais dans le cadre par exemple de son utilisation avec des tarifs « real-time-

⁵ - « Real-time Pricing (RTP) » - le consommateur paye le prix de l'électricité au prix du marché électrique pour l'heure d'utilisation. Les consommateurs sont informés sur les tarifs soit dans l'heure précédente, soit avec un jour d'avance [U.S._Department_of_Energy, 2006], [Faruqui & Hledik, 2007], [Formby, 2007].

⁶ - « Critical peak pricing (CPP) » - le consommateur paye un prix plus élevé pour son électricité pendant les pointes du réseau mais il paye moins pendant les périodes hors pointe, un exemple de ces tarifs est l'Option TEMPO d'EDF [U.S._Department_of_Energy, 2006],[Faruqui & Hledik, 2007], [Formby, 2007].

pricing », on peut envisager une optimisation maximale du système de chauffage pour éviter les prix hauts.

L'évaluation de la flexibilité comprend toutes les contributions maximales que le contrôle ne peut fournir au réseau électrique mais aussi les effets négatifs de ce contrôle (effet de Recouvrement – voir Chapitre 3.5.1). Il y a seulement quelques études qui portent sur l'analyse de la flexibilité des chauffages à accumulation, notamment par Stadler [Stadler, 2008], qui a fait une analyse des effets d'un contrôle optimisé, dans le cadre d'une utilisation, de ces équipements électriques, avec des énergies renouvelables. Dans la Figure 1-14 on peut voir les gains positifs en puissance en fonction de la température extérieure, du temps possible de décharge et de l'heure de la journée.



Source : [Stadler, 2008]

Figure 1-14 –Potentiel du control positif de la puissance pour des chauffages à accumulation existants en Allemagne

Une étude de Stamminger [Stamminger, 2009] montre qu'un scénario où les chauffages à accumulation reçoivent un signal par opérateur permettra de décaler la charge de ces équipements jusqu'à 90 % pendant quelques heures.

Cependant toutes ces études portent sur l'évaluation des systèmes d'accumulation et non sur les systèmes de chauffage électrique les plus répandus : les convecteurs et radiateurs électriques. Les systèmes de chauffage électrique sans accumulation, restent ainsi très peu exploités par rapport à l'analyse de leur potentiel en termes de contrôle à distance.

Comme les systèmes courants n'ont pas (ou presque) d'inertie, il faut prendre en compte l'inertie du bâtiment et ses charges pour pouvoir analyser le vrai potentiel des convecteurs et radiateurs électriques conventionnels.

Dans un article d'Escrivá et al. [Escriva et al., 2009], différentes stratégies de contrôle des climatiseurs individuels réversibles, dans un bâtiment d'enseignement, sont analysées à travers des travaux purement empiriques. Les stratégies testées comprennent des ordres d'effacement, préchauffage et cyclage On/Off. Les spécificités de chaque stratégie sont observées et décrites. Une application est faite pour une stratégie qui combine le pré-chauffage avec des intermittences pendant la journée. Dans le but d'éviter la consommation et les pics dus au chauffage lors des heures pleines, cette stratégie est appliquée. Les résultats montrent une réduction de 30 % sur le pic de la matinée (démarrage du système de chauffage) et des économies monétaires de l'ordre de 5 %.

L'application à grande échelle de cette technique reste impossible car elle nécessite d'un grand travail d'expérimentation.

1.2.1.2. Climatisation

Plusieurs études ont été menées sur le contrôle des climatiseurs surtout dans le secteur tertiaire. La grande majorité de ces études a comme objectif d'évaluer les économies générées en optimisant les intermittences et changements de consignes, en fonction des tarifs électriques.

Une étude menée par Reddy. A.T. et al. [Reddy et al., 1991] décrit une forme de calcul pour déterminer combien de temps on peut arrêter le climatiseur en fonction de la constante de temps du bâtiment.

La performance thermique du bâtiment est représentée par une simple équation du premier ordre :

$$\frac{C}{dt} \frac{dT_i(t)}{dt} = L[T_a(t) - T_i(t)] + Q_a(t) - Q_c(t) \quad (1)$$

Avec,

C - Capacité thermique du bâtiment

L - Coefficient de pertes thermiques du bâtiment

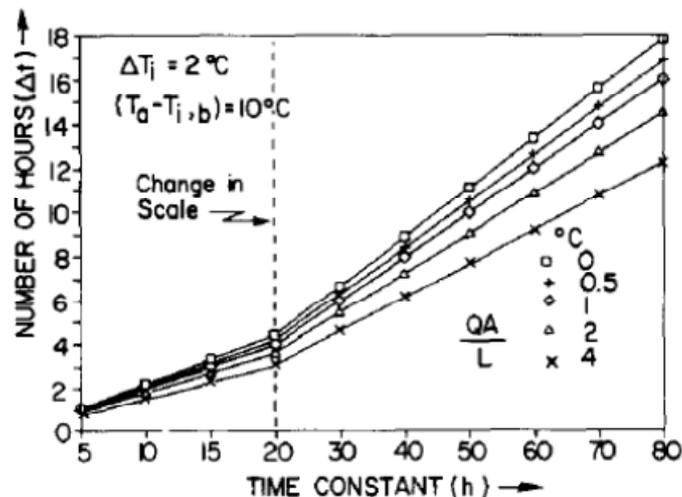
T_i(t) - température interne

T_a(t) - Température extérieure

Q_a(t) - Somme de tous les gains internes

Q_c(t) - Energie thermique enlevée par le climatiseur

Prenant en compte que la constante de temps du bâtiment (τ) est calculée par $\tau = C/L$, Reddy a calculé le temps pendant lequel climatiseur pourra être éteint, avec un $(T_a - T_i)_{\text{initial}} = 10^\circ\text{C}$, pour que la température interne baisse juste de 2°C en fonction de la constante de temps du bâtiment (Figure 1-15).



Source: [Reddy et al., 1991]

Figure 1-15 - Nombre d'heures qu'un climatiseur peut rester délié en fonction de la constante de temps du bâtiment

Dans la Figure 1-15 on peut voir le nombre d'heures où un climatiseur peut être arrêté en fonction de la constante de temps du bâtiment pour cinq rapports différents de Q_a / L . On peut en déduire que même pour de faibles constantes de temps on peut toujours arrêter pendant au moins une heure. Cependant l'aptitude au contrôle à distance est plus marquée dans des bâtiments à grandes constantes de temps.

Cette méthodologie permet de classer d'une manière globale l'aptitude de l'ensemble climatiseur + bâtiment pour le contrôle à distance. Néanmoins elle reste une solution très simplifiée car le bâtiment est représenté par un seul nœud, c'est-à-dire que la totalité des parois, l'air intérieur et les objets faisant partie de l'intérieur du bâtiment ont la même température. Pour permettre d'évaluer le vrai potentiel énergétique et les impacts sur le confort thermique, un modèle plus précis devrait être utilisé.

Deux études menées par Braun [Braun et al., 2001] [Braun, 2003] analysent la performance de stockage thermique des bâtiments tertiaires. En observant les effets sur la courbe de charge journalière des différents temps de pré-rafraichissement du bâtiment, ils analysent différentes stratégies de régulation des consignes pendant les heures de pointe (tarification « *TOU pricing* »⁷).

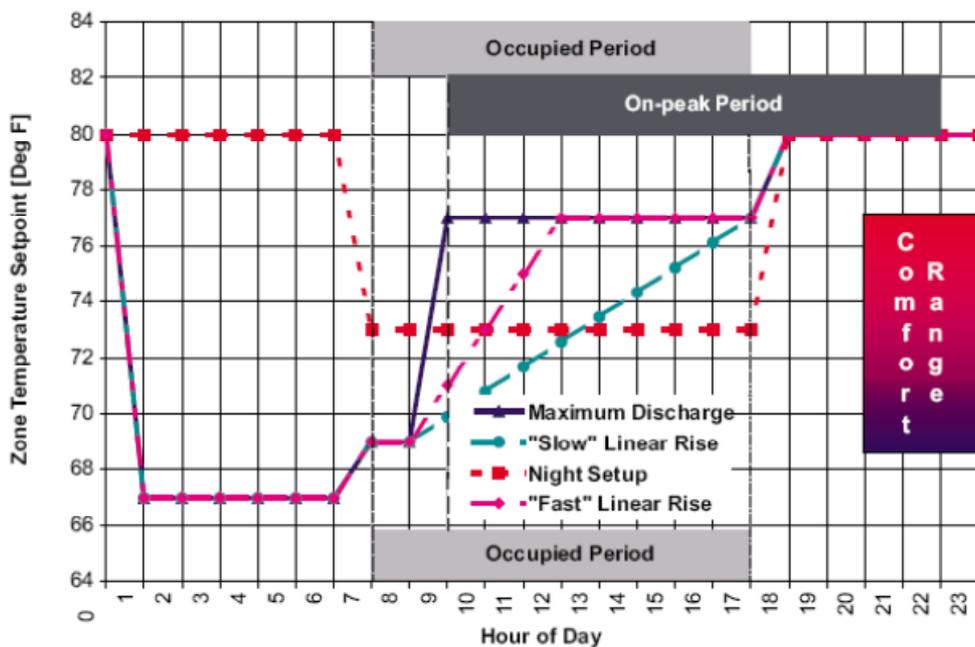
Les simulations dynamiques sont réalisées selon la méthode décrite par Seem [Seem, 1987]. La méthode est basée sur des fonctions de transfert pour décrire le comportement thermique d'un bâtiment voire une pièce. Les coefficients des fonctions de transfert peuvent être estimés à partir de techniques de régression appliquées à des mesures sur site via les études de Braun et Chaturvedi [Braun & Chaturvedi, 2002] ou à partir des caractéristiques des différents composants du bâtiment à simuler. Ces fonctions permettent de calculer les besoins de rafraichissement et l'évolution de température dans la pièce simulée avec un pas de temps d'une heure (plus commun). La consommation de la climatisation (« *Chillers water cooling*») est déterminée par des corrélations.

⁷ - Tarification « *Time Of Use pricing* » : les périodes et les prix sont fixés par avance (des mois voir années). Les prix ne peuvent pas changer pendant les périodes des pics de consommation [Formby, 2007]. Un exemple de ces tarifs, ce sont les Heures creuses / heures pleines largement diffusées en France.

La méthodologie d'analyse de la performance de stockage thermique est basée soit sur la détermination d'une stratégie pour minimiser le coût d'exploitation (en modifiant la consigne de température) soit par la réduction maximale des besoins de rafraîchissement pendant les périodes de pointe. Ces deux stratégies sont sujettes à des contraintes de température pour avoir toujours des conditions de confort thermique acceptables.

Dans l'étude de [Braun, 2003] des simulations sont menées sur deux types de bâtiments, avec inertie lourde et légère, pour évaluer l'impact de chaque stratégie optimale. Les résultats montrent que des économies entre 5 et 57 % peuvent être atteintes en termes de consommation selon le type de bâtiment et la température extérieure. Pour la stratégie de réduction des pics d'énergie, les réductions peuvent aller de 10 jusqu'à 35 % du pic de consommation en fonction du type de bâtiment et de la température extérieure.

Différentes stratégies de « décharge » de froid (Figure 1-16), par augmentation progressive de la consigne de température après avoir stocké le froid pendant la nuit, sont appliquées à des bâtiments dans des différentes régions, à partir de la technique des modèles inverses, et des structures tarifaires.



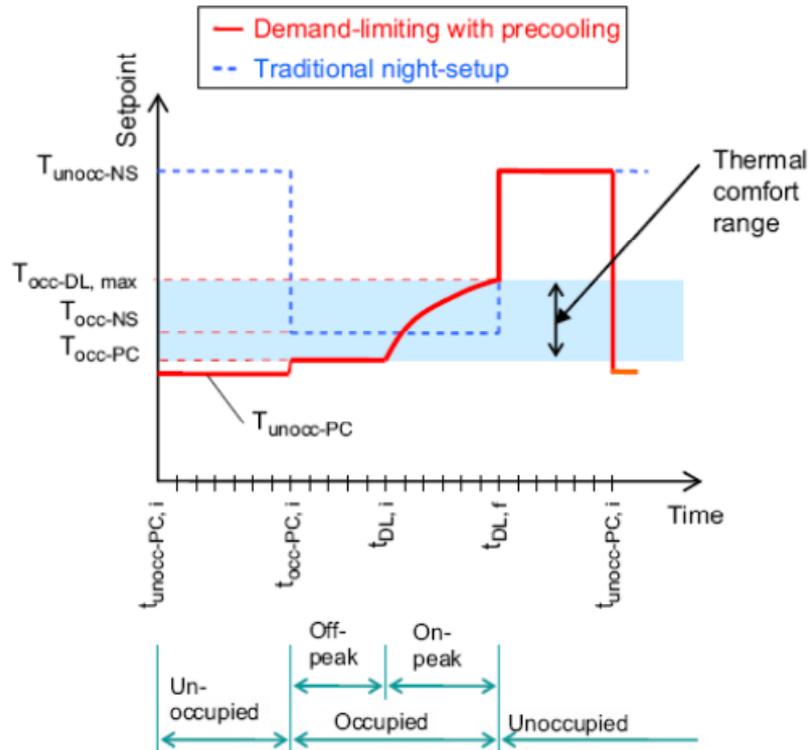
Source : [Braun, 2003]

Figure 1-16 – Différentes stratégies de décharge

La différence entre stratégies résulte d'une évolution de la consigne de température plus ou moins lente. Les résultats montrent que les économies monétaires peuvent aller de -10,6 jusqu'à 50,3 %, en fonction de la stratégie utilisée, du climat et de la structure tarifaire, par rapport au cas de référence (climatisation seulement pendant les heures d'occupation).

Une étude réalisée par Kyoung-ho et Braun [Lee & Braun, 2008c] fait aussi une analyse du contrôle de la consigne pour limiter les appels de puissance (« Demand limiting »), pendant les heures de pointe (concomitantes avec les heures d'occupation), des climatiseurs.

L'évolution optimale de la consigne, développée par [Lee & Braun, 2008b] et [Lee & Braun, 2008a] liée au pré-rafraichissement du bâtiment, est déterminée à travers d'une méthode numérique consistant à déterminer un ratio de rafraichissement constant toute en restant dans les limites imposées par la zone de confort (Température minimale et maximale acceptables) (Figure 1-17).



Source: [Lee & Braun, 2008c]

Figure 1-17 – Evolution des Températures de consigne pour un contrôle standard et avec une stratégie de réduction de la charge pendant les pointes

Cette stratégie permet une réduction d'environ 30 % du pic de charge de refroidissement par rapport à un contrôle standard (« Night-Setup » - courbe pointillée bleu sur la Figure 1-17). Cette réduction est faite en ayant une consommation constante pendant les heures de pointe.

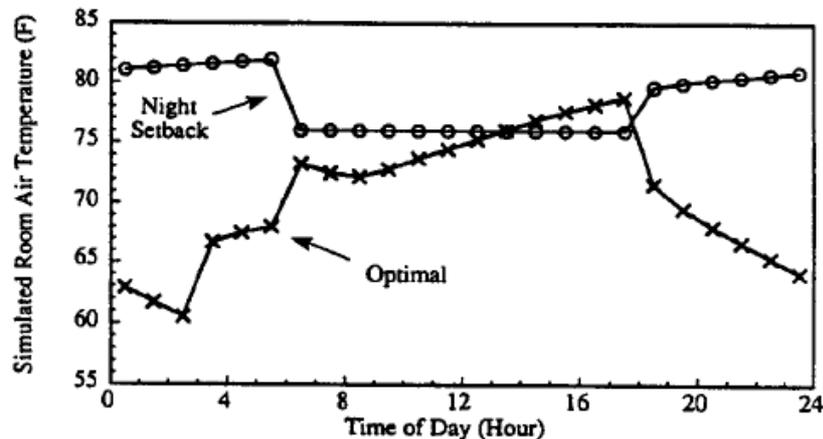
Néanmoins, ces résultats font référence à des bâtiments tertiaires et non des bâtiments résidentiels. Sachant qu'il faut connaître le profil d'occupation, cette stratégie semble difficile à appliquer au secteur résidentiel.

Un problème de ces études [Braun et al., 2001],[Braun, 2003],[Lee & Braun, 2008c] et [Lee & Braun, 2008b], c'est l'utilisation du pas de temps horaire, qui a comme résultat une courbe de charge moyennée à chaque heure ne permettant pas de distinguer les différents pics de consommation créés pendant les changements de consigne. Il faut aussi noter que les stratégies étudiées se basent sur un profil d'occupation connue, ce qui n'est pas le cas dans le secteur résidentiel. Ces études montrent aussi que les résultats sont très fortement affectés par beaucoup de facteurs : climat, profil d'occupation, structure tarifaire...

Il faut aussi noter que l'évaluation globale (plusieurs bâtiments) n'est pas réalisée dans ces études, à l'exception de [Lee & Braun, 2008a], et elle est appliquée et analysée par un seul bâtiment.

D'autres études [Morris et al., 1994] [Zhou et al., 2005] analysent aussi les évolutions de la consigne optimale, pour les bâtiments tertiaires, visant la réduction de l'énergie consommée et la réduction des pics de consommation pendant les heures de pointe (exemple sur la Figure 1-18).

Ces deux études utilisent des logiciels existants, TRNSYS et Energy Plus, pour calculer les consommations et les évolutions de température.



Source : [Morris et al., 1994]

Figure 1-18 – Optimisation de la consigne de température pour la minimisation des pics de consommation entre les 7 et 19 heures

En particulier, Zhou et al. [Zhou et al., 2005] font cette analyse en donnant un coût monétaire à l'inconfort des occupants permettant que, les consignes puissent dépasser les limites de la zone de confort (même pour de courtes durées).

Ces études montrent que des réductions significatives peuvent être atteintes si une étude d'optimisation est faite pour gérer les consignes. Cependant la méthode d'analyse se restreint à l'analyse des consommations et les appels moyens sur une heure des systèmes de climatisation. Encore une fois, ces stratégies nécessitent une connaissance très précise des périodes d'occupation, donc adaptées au secteur résidentiel et l'évaluation de l'impact de ces stratégies sur plusieurs bâtiments n'est pas réalisée.

Un article de Katipamula [Katipamula & Lu, 2006] fait une évaluation des différentes stratégies de contrôle, dans un contexte de « Demand Response » (DR), pour le secteur résidentiel, basée sur des outils de simulation. Dans son étude, Katipamula étudie les effets des différentes stratégies sur les évolutions de température et sur les appels de puissance d'un climatiseur. L'étude est extrapolée à 1000 bâtiments et les différentes stratégies (Pré-rafraîchissement, coupures pendant les périodes de pointe,...) sont couplées avec des tarifs dynamiques (Critical peak pricing et Real time pricing). Les résultats montrent que des réductions moyennes de puissance peuvent attendre 2.55 kW/bâtiment pendant les périodes de pointe.

Toutefois, cet article repose sur un modèle de simulation très simple que ne permet pas d'évaluer les évolutions de température correctement ([Fraisie et al., 2002] [Kummert, 2001]) et l'impact des conditions externes n'est pas évalué.

Une étude menée par Stamminger [Stamminger, 2009] montre que au travers de signaux envoyés aux consommateurs sur la disponibilité d'énergies renouvelables ou des tarifs plus bas, environ 10 % des utilisateurs acceptent à décaler le démarrage de leur climatiseur.

D'autres possibilités de contrôle ont été identifiées dans cette étude comme le démarrage différé du climatiseur, l'interruption de son fonctionnement ou l'augmentation de la consigne du thermostat. Pour ces options, il est estimé dans l'étude que 10 % des climatiseurs équipés de ces options peuvent être décalés/arrêtés pendant 15 à 60 minutes.

1.2.1.3. Discussion Usages thermiques

Des études sur le chauffage électrique montrent qu'il existe un vrai potentiel pour les systèmes de chauffage à accumulation car leur capacité de stockage permet facilement de décaler les consommations. Une autre étude montre qu'à partir des expériences on peut améliorer la gestion de la consommation pour éviter la consommation pendant les périodes de pointe. Néanmoins, les études sur la gestion de la demande du chauffage électrique restent réduites.

Comme on l'a vu les systèmes de climatisation ont un vrai potentiel en termes de gestion de la demande. Cependant, la grande majorité des études porte sur le secteur tertiaire où les caractéristiques de systèmes et d'utilisation ne sont pas les mêmes que dans le secteur résidentiel.

La plupart des études porte sur le choix des consignes pour éviter les appels de puissance et la consommation électrique pendant les périodes de pointe. Ces stratégies ont été les seules à être vraiment optimisées (quantification de la flexibilité) en fonction des tarifs électriques existants. Ces optimisations faites en fonction des profils d'occupation et des options tarifaires, ne prennent pas en compte la flexibilité de ces systèmes dans le cas des situations d'urgence, où des réductions maximales des appels de puissance, voire l'arrêt des systèmes, sont nécessaires.

Cependant, dans le secteur résidentiel les profils d'occupation ne sont pas constants. On peut seulement utiliser des profils moyens en fonction des jours de la semaine pour calculer les optimisations des choix de consigne. Si on part de ces profils moyens, on risque d'engendrer des conditions inconfortables et/ou sur consommer de l'énergie.

C'est seulement dans le cas des détecteurs de présence, comme les systèmes de télésurveillance, que l'on peut déduire ces profils d'une manière plus précise et ainsi adopter ces stratégies au cas par cas.

Un autre point faible de la majorité de ces études, c'est que l'évaluation du confort se fait sur la température moyenne du bâtiment ou par des modèles pas très précis en termes de représentation des évolutions de température.

Une dernière critique sur les études menées porte sur les pas de temps (une heure), utilisée dans ces études, qui ne permet pas de regarder les effets en termes de puissance avec une bonne précision.

Toutefois, on peut toujours envisager une même analyse des stratégies présentées sur le cas du chauffage électrique.

1.2.2. Eau Chaude Sanitaire (ECS)

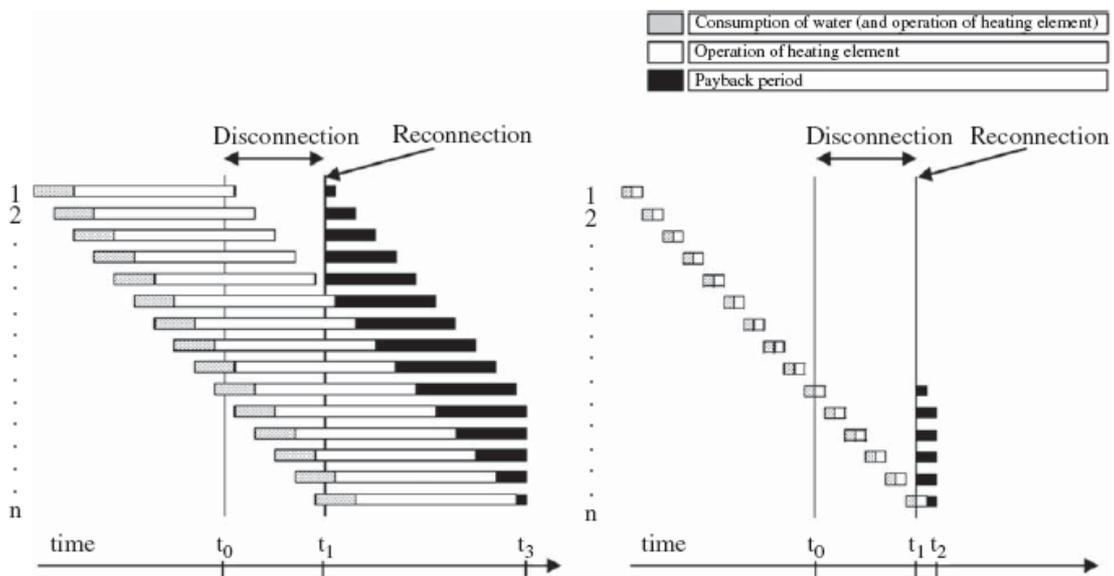
Les systèmes d'ECS électriques les plus répandus sont les ballons d'eau chaude. Leur capacité à stocker l'énergie permet un contrôle plus facile. Pour les systèmes d'ECS instantanés électriques, le décalage de leur mise en route reste pratiquement impossible car comme le nom indique, ces systèmes consomment l'énergie au moment où l'utilisateur a besoin d'ECS. Mais ces systèmes représentent une part marginale du parc français.

Ci-dessous, on présente des études menées sur le contrôle des systèmes d'ECS.

Quelques approches en termes de contrôle de ces équipements sont décrites dans l'étude menée par Stamminger [Stamminger, 2009] pour un fonctionnement plus flexible que pour les cas existants en France comme l'utilisation d'un dispositif interne de gestion, pouvant allumer ou étendre l'appareil en fonction des signaux. Cette stratégie permet de décaler environ 75 % des appareils (avec cette option) en fonctionnement, pendant quelques minutes ou quelques heures.

Une étude menée par Ericson [Ericson, 2009] montre la flexibilité pour les ballons d'ECS en Norvège. Le modèle utilisé est basé sur des régressions de données expérimentales, capables de prédire la consommation moyenne d'électricité à chaque heure. Le modèle permet de déterminer aussi les effets dus à la déconnection et la reconnexion des ballons.

Dans cette étude, le niveau de réduction de la charge devient plus important pour les consommateurs qui consomment beaucoup d'eau chaude sanitaire mais l'effet de « payback » (recouvrement⁸) devient aussi plus important. Dans la Figure 1-19, on retrouve les caractéristiques du contrôle pour deux types de consommation (basse et haute) et pour des moments d'application du contrôle différents.



SOURCE: [Ericson, 2009]

Figure 1-19 – Coupure et recouvrement des ballons d'ECS pour une grande consommation (Gauche) et pour une petite consommation d'ECS.

Dans la Figure 1-19, on peut voir que l'influence des consommations sur le recouvrement est grande. Si on observe le cas correspondant aux grandes consommations d'ECS, l'effet de recouvrement représente la moitié de la consommation évitée lors de la coupure. Dans le cas des petites consommations (Figure 1-19 - graphique droit), l'énergie consommée pendant le recouvrement, des ballons d'ECS affectés par la coupure, est cinq fois plus grande que la puissance évitée avec la coupure.

L'étude calcule une réduction moyenne entre 0.35 et 0.58 kWh/h pendant la matinée et entre 0.18 et 0.59 kWh/h dans la fin d'après-midi. Cependant, il faut prendre en compte le profil de puisage d'ECS, la température d'entrée, le type d'équipements présents dans le parc (Puissance « type » des équipements) selon la zone démographique en étude, pour pouvoir quantifier la vraie réduction [Ericson, 2009]. Par exemple, une température d'entrée plus basse va causer une phase de recouvrement plus grande et vice-versa.

Dans un article de Lu [Lu & Katipamula, 2005], différentes stratégies de contrôle sont étudiées pour un groupe de 1000 ballons l'ECS en fonction des prix du marché d'électricité. L'effacement et le contrôle de la consigne de température (baisser la consigne pendant quelques heures et après le retour à la consigne initiale) provoque des pics de puissance très élevés lors de la mise en marche des ballons d'ECS, à cause d'une perte de diversité. Cette particularité a été aussi démontrée par [Orphelin[ORPHELIN, 1999]. Cependant une stratégie où la remise de la consigne se fait par petits pas (2.5 °C/20 minutes) permet de réduire grandement ce phénomène.

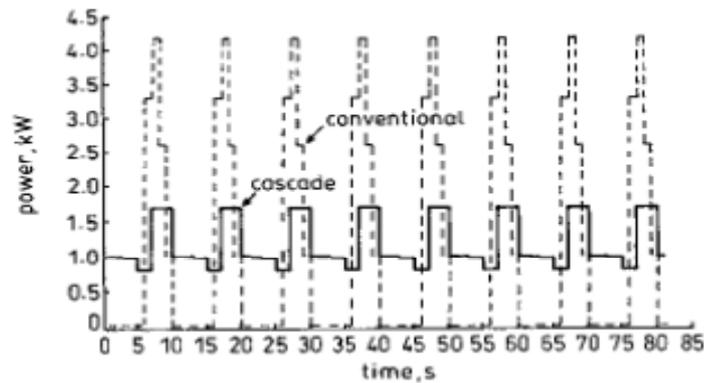
Les économies monétaires sont estimées en appliquant des contrôles simples sur la consigne. Cependant, les économies monétaires par équipement restent très faibles (quelques centimes de \$ (*dollar*) par jour).

Une autre étude menée par Newborough.M et Augood.P [Newborough & Augood, 1999] a analysé la réduction possible des appels de puissance dans une maison. Il montre que même pour une très forte consommation d'eau (309 litres d'eau consommée par jour, pour un ballon de 210 litres), la production d'eau chaude peut être satisfaite avec une alimentation de longue durée (presque continue) par une puissance de 1 kW au lieu d'avoir plusieurs pics de consommation conventionnels de 2.5 kW.

1.2.3. Cuisson

Comme les appareils de cuisson ont normalement des puissances élevées, leur contrôle semble théoriquement logique. Toutefois, à cause du grand impact sur les habitudes des consommateurs, des stratégies de contrôle simples, comme des effacements, ne peuvent pas être appliquées.

[Newborough & Augood, 1999] montrent comment les thermostats de deux ou plus plaques de cuisson peuvent être modulés pendant leur fonctionnement pour éviter l'utilisation de la puissance nominale de plusieurs plaques en même temps sans interférer avec la cuisson.



Source: [Newborough & Augood, 1999]

Figure 1-20 – Exemple de l'effet du contrôle 'Cascade' dans des tables de cuisson avec consignes basses

Dans la Figure 1-20 on peut voir un fonctionnement de quatre plaques de cuisson avec des consignes basses, de 1/10 jusqu'à 7/10 (1 – niveau moins fort et 10 niveau plus chaud). Dans le cas « conventionnel » (cas de référence – sans aucun contrôle) on a des pics de consommation de 4.3 kW, mais avec l'application d'une stratégie de contrôle du type cascade⁹, on arrive à baisser ce pic jusqu'à 1.65 kW, soit une réduction de 61 % de la puissance appelée.

Stamminger [Stamminger, 2009] donne quelques options de contrôle pour des équipements de cuisson, mais l'impact de ces contrôles reste faible car seulement 5 % des consommateurs accepteront un contrôle/décalage du fonctionnement de ces équipements. Le temps de décalage maximum doit être d'environ 30 minutes car les heures des repas sont plus ou moins fixes.

1.2.4. Machine à Laver

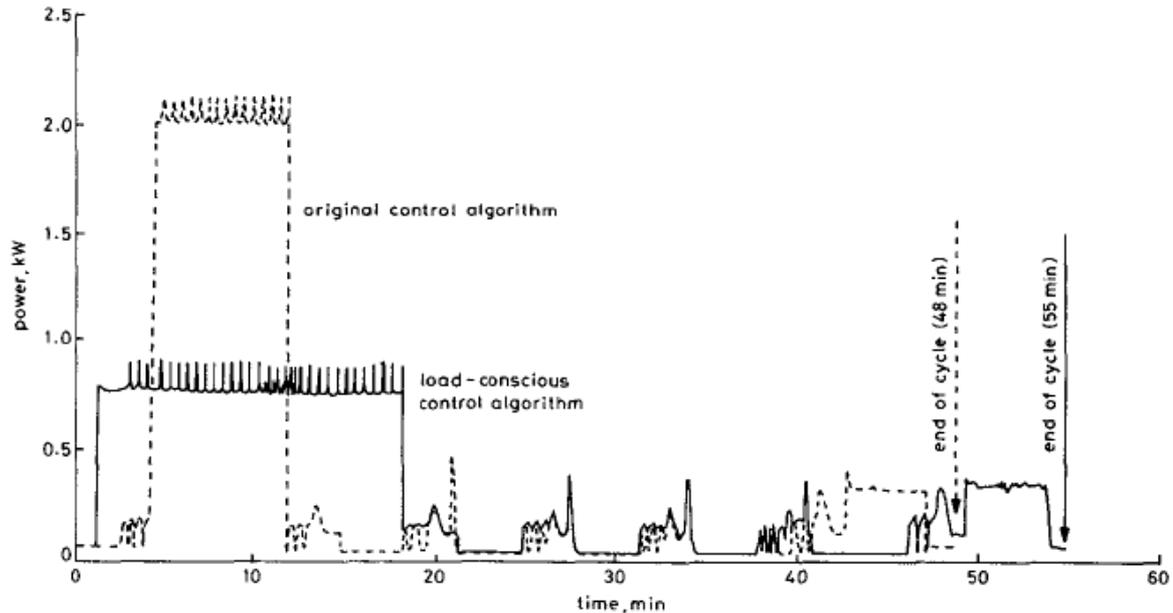
Comme on l'a vu les machines à laver sont normalement utilisées aux heures les plus critiques pour le réseau. Dans ce sens et en imaginant un possible décalage ou un contrôle intelligent, on fait ci-dessous une analyse des études existantes.

L'étude menée par le Prof. Dr. Stamminger [Stamminger, 2009] donne quelques nouvelles approches pour le contrôle de ces équipements, notamment le contrôle à distance à travers des signaux envoyés, visant à décaler 10 % des opérations de lavage en moyenne 3 heures (jusqu'à 9 heures au maximum).

Cette étude a été basée sur des probabilités d'opération pendant la journée et sur des courbes de puissance hypothétiques. Par conséquent, les effets négatifs des différents contrôles et une analyse plus profonde des modes/types de contrôle d'un équipement et ses limites ne sont pas évalués dans cette étude.

L'étude de [Newborough & Augood, 1999] présente une stratégie de contrôle des machines consistant à réduire la puissance de la résistance de la machine à laver en augmentant le temps de lavage (Figure 1-21).

⁹ Mode cascade – les alimentations des usages sont coupés de façon hiérarchisée permettant ainsi un fractionnement des puissances.



Source : [Newborough & Augood, 1999]

Figure 1-21 – Comparaison du profil original et du Profil avec stratégie de contrôle

Dans le cas évalué dans cette étude, une réduction de 1.3 kW en puissance, pendant le chauffage d'eau, peut être atteinte pour une augmentation du temps de lavage de 7 minutes. Des études détaillées ont été menées par le « working group Group for efficient appliances » [GEA, 1995a] où on compare l'efficacité de lavage par rapport à la température et au temps de lavage utilisés.

1.2.5. Sèche-linge

Selon Stamminger, on peut estimer une utilisation d'environ 5 % des équipements avec départ différé, après l'envoi des signaux sur la disponibilité, dans le cas d'une énergie provenant des énergies renouvelables.

Une autre option de contrôle consiste à avoir un contrôleur interne, qui va faire des petites interruptions de l'alimentation de la résistance électrique en fonction des signaux. Il est estimé que 30 % des machines (ayant cette option) peuvent fonctionner avec cette stratégie de contrôle. Toutefois, ces options de contrôle ne sont pas encore largement disponibles sur le marché. On peut trouver quelques exemples de ce type de contrôle comme le chez fabricant de sèche-linges Whirlpool, qui compte fabriquer 1 million de machines compatibles avec le « Smart-Grid », c'est-à-dire que la machine réagit à des signaux provenant du réseau électrique en décalant son fonctionnement ou à travers des interdictions pendant un certain temps pour l'élément chauffant.

1.2.6. Lave-vaisselle

A nouveau, l'étude menée par Stamminger [Stamminger, 2009] montre qu'environ 20 % des machines avec départ différé peuvent être décalées de 1 à 19 heures. Le démarrage à travers des signaux via les réseaux électriques a été aussi étudié et cette stratégie peut permettre un décalage de 10 % des opérations de lavage à tous les instants (pour les machines avec cette stratégie).

1.2.7. Réfrigérateurs / Congélateurs

Les réfrigérateurs et les congélateurs sont des équipements très répandus dans un logement européen. Même si leur puissance n'est pas très élevée, leur fonctionnement reste presque continu, avec des cycles d'environ une heure [Lu & Katipamula, 2005].

Stamminger [Stamminger, 2009] propose plusieurs stratégies de contrôle pour les réfrigérateurs et congélateurs. Un de ces contrôles consiste à envoyer un message aux consommateurs pour éviter d'ouvrir l'appareil et introduire de nouveaux produits pendant les pointes. Cependant, l'acceptation maximale par les consommateurs reste très faible ~5 %. A cause de la faible flexibilité des habitudes des consommateurs en termes d'heure des repas cette option serait acceptable avec un décalage de 30 minutes maximum.

Une autre étude, [Stadler et al., 2009], fait une évaluation, à travers de simulations, de deux différents types de contrôle pour un parc de 5000 réfrigérateurs. Le modèle physique utilisé dans les simulations est basé sur un bilan d'énergie décrit par l'équation suivante :

$$T_{i+1} = \varepsilon T_i + (1 - \varepsilon) \left(T^0 - \eta \frac{q_i}{A} \right), \text{ avec } \varepsilon = e^{-\frac{\tau A}{mc}} \quad (2)$$

Avec :

T_{i+1} – température du pas temps suivant (K)

A – isolation du réfrigérateur (W/K)

mc – capacité thermique de stockage (J/kg.K)

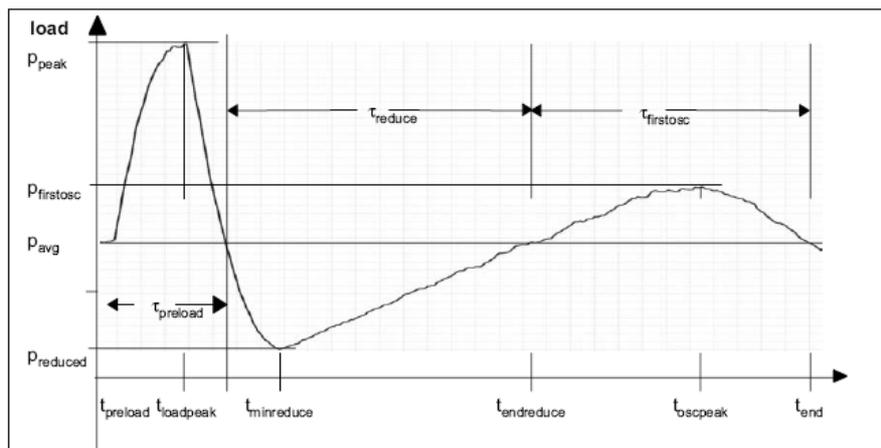
τ – pas de temps

T^0 – température initial (K)

η – efficacité frigorifique du réfrigérateur

q_i – puissance électrique délivrée, quand le système de refroidissement est allumé (W).

La première méthode de contrôle consiste à envoyer un signal pour charger le réfrigérateur avec stockage thermique ou pour décharger ce stockage thermique (Figure 1-22).



Source : [Stadler et al., 2009]

Figure 1-22 – Evolution de la charge électrique de 5000 réfrigérateurs recevant un signal de stockage thermique au temps $t_{preload}$

Un signal est envoyé aux différents équipements pour stocker le froid a qui est représenté dans la partie gauche de la Figure 1-22. Après cette phase il y a une période de réduction de la demande électrique pendant « τ_{reduce} ». Pendant ce temps le froid stocké est déchargé. Si la puissance appelée est inférieure à la puissance moyenne appelée dans le cas de référence (sans contrôle), il est considéré qu'on est dans la période de réduction de la demande. Le période « $\tau_{firstosc}$ » dénote la phase après le contrôle où on aura une consommation supérieure au cas de référence. Ce pic de consommation est du au fait que les réfrigérateurs contrôlés sont synchronisés lors du rallumage (perte du foisonnement des équipements).

Les résultats de ce type de contrôle sont présentés dans le Tableau 1-1.

Tableau 1-1 – Durée des plusieurs niveaux de réduction de la puissance appelée en fonction du temps entre le signal pour stocker le « froid » et le signal pour décharger le « froid ».

Spread (min)	Load reduction levels in percent of the average load					
	100%	90%	75%	50%	25%	10%
0	0	11	23	61	97	111
10	0	10	23	60	97	112
20	0	3	23	59	96	112
30	0	0	21	57	94	112
40	0	0	16	55	93	110
50	0	0	3	53	90	109
60	0	0	0	48	87	107

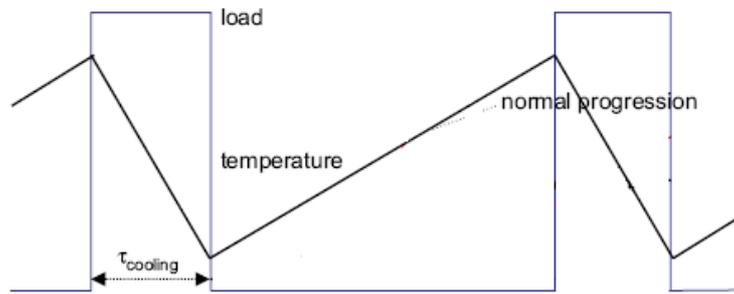
Exemple : Pour un intervalle de 20 minutes entre les signaux de stockage et déstockage, on peut réduire la puissance moyenne appelée de 50 % pendant 59 minutes.

Source : [Stadler et al., 2009]

Pour ce type de contrôle, on peut avoir une réduction d'environ 50 % de la puissance moyenne appelée pendant à peu près une heure.

Un autre type de contrôle décrit consiste à envoyer un signal en avance pour préciser à quel moment on sollicite la réduction de la charge. Ensuite, chaque appareil reprogramme ses cycles de

refroidissement (Figure 1-23) pour pouvoir avoir la température minimale acceptable, dans le réfrigérateur, au temps spécifié par le signal et ainsi avoir le maximum de froid stocké.



Source : [Stadler et al., 2009]

Figure 1-23 – Représentation des cycles de refroidissement d'un réfrigérateur

Les résultats de ce type de contrôle sont montrés dans le Tableau 1-2.

Tableau 1-2- Temps de réduction de la charge en fonction de la réduction de la puissance moyenne appelée et en fonction du temps de préavis [Stadler et al., 2009]

Lead time (min)	Load reduction levels compared to average						
	100%	90%	75%	50%	25%	10%	>0
10	39	44	47	51	55	58	60
20	47	52	57	75	85	90	94
30	47	52	57	76	112	118	120
40	47	52	57	76	112	121	128
50	47	52	57	76	112	121	128

Exemple : Pour un préavis de 30 min et pour une réduction de 75% de la puissance moyenne appelée, on aura un temps de réduction maximal de 57 minutes.

Source : [Stadler et al., 2009]

Pour ce type de contrôle on peut arriver à une réduction de 100 %, pendant 39 à 47 minutes en fonction du temps de préavis. Des temps plus grands pourront être obtenus pour des réductions de la charge plus petites.

1.2.8. Synthèse de l'étude sur le potentiel des équipements résidentiels pour la gestion de la demande

L'analyse des différentes caractéristiques de fonctionnement et usages, mais aussi des études sur la gestion de la demande, nous a permis d'avoir une image plus claire du potentiel des équipements résidentiels les plus importants en termes de consommation et puissance. La synthèse de cette étude est présentée dans le Tableau 1-3 qui montre le potentiel des équipements à grande puissance. Elle est divisée en différentes colonnes qui représentent des différentes caractéristiques observées dans cette étude.

Tableau 1-3 – Synthèse de l'aptitude des différents équipements pour la gestion de la demande

	Partie de la consommation globale	Utilisation pendant les pointes	Puissance appelé	Taux de pénétration	Capacité de stockage ?	Décalage du fonctionnement possible ?	Régulation / optimisation pendant le fonctionnement ?
<i>Chauffage électrique</i>	+++	++	+++	+++	Oui*	Oui*	Oui
<i>Climatisation</i>	••	++	+++	••	Oui*	Oui*	Oui
<i>ECS</i>	++	••	++	++	Oui	Oui	Non
<i>Machine à laver</i>	+	++	+	+++	Non	Oui	Oui
<i>Sèche-linge</i>	+	+	++	+	Non	Oui	Non
<i>Lave-vaisselle</i>	+	++	++	+	Non	Oui	Oui
<i>Congélateur/ réfrigérateur</i>	+	++	••	+++	Oui*	Oui*	Oui
<i>Tables de cuisson et fours électriques</i>	+	++	+++	+++	Non	Non	Oui

Légende :
+++ Très grand
++ Grand
+ Moyen
• Petit
•• Très petit

*- Faisant appel à l'inertie du bâtiment ou à des éléments secondaires avec inertie

Le chauffage électrique apparaît comme l'équipement ayant le plus de potentiel car son usage peut, en théorie, être décalé ou optimisé, et l'impact de ces systèmes dans la courbe de charge et la consommation électriques ne sont pas négligeables. Cependant, une grande partie du potentiel de ce système réside dans la capacité du bâtiment et non de l'équipement en lui-même.

La climatisation apparaît comme un équipement ayant un potentiel semblable au chauffage électrique, mais à cause de son faible taux de pénétration et des caractéristiques du réseau électrique en été, son impact global reste très faible. Comme pour le chauffage, les systèmes de climatisation reposent sur la capacité thermique du bâtiment pour que des contrôles puissent être effectués.

Un des équipements déjà très connu en gestion de la demande, l'ECS, apparaît bien évidemment comme un équipement ayant un potentiel élevé à cause de sa grande capacité de stockage et à son rôle dans la consommation globale.

Les machines à laver, lave-vaisselle et sèche-linge sont des équipements qui en l'absence de stockage peuvent cependant être décalés ou voir leur fonctionnement optimisé pour éviter de consommer ou encore réduire les appels de puissance. Cependant l'impact des sèche-linges lors des pointes (notamment les pointes d'hiver 18-20 heures) sera plus faible et aucune étude n'a été menée sur la réduction de leur consommation/puissance pendant le fonctionnement.

Les réfrigérateurs/congélateurs sont des équipements avec un grand potentiel technique (s'ils sont chargés), cependant à cause de leur faible puissance, l'impact unitaire de ces équipements est très faible.

Les tables de cuisson/fours ont une puissance très élevée mais peu d'options sont disponibles pour les contrôler. Seules des options de régulation sont possibles dans des conditions spéciales d'utilisation (ex : les thermostats ne doivent pas être simultanément en position de température maximale).

1.3. Conclusion - Potentiel d'action sur la demande électrique résidentielle

L'objectif de ce chapitre était de déterminer l'aptitude et le potentiel des différents équipements électriques résidentiels pour la gestion de la demande. Avec cet objectif, on a d'abord identifié les usages ayant le plus d'impact sur la consommation à l'échelle nationale et les périodes critiques du réseau électrique. Puis, on a regardé les différentes caractéristiques de consommation et de fonctionnement des équipements pour, d'une part comprendre les impacts potentiels de leur contrôle sur les périodes critiques du réseau électrique et d'autre part pour comprendre les caractéristiques du fonctionnement (puissance utilisée, moyens de stockage disponibles...).

Les évolutions technologiques ont été aussi évaluées pour que le potentiel analysé prenne en compte les développements futurs et ainsi déterminer les équipements qui seront plus ou moins importants dans le futur pour la gestion de la demande.

Finalement, on a réalisé une étude bibliographique/technique de l'état de l'art en termes de contrôle des différents équipements.

Toute cette analyse nous a amené à une synthèse du potentiel des équipements présenté dans le Tableau 1-3.

On peut ainsi conclure que l'usage sur lequel il faut concentrer les efforts est le chauffage électrique et ensuite l'ECS (déjà largement exploité par des contrôles directs à distance) et l'électroménager de lavage.

Ce chapitre nous a permis de déterminer d'une manière qualitative le potentiel des équipements, cependant il reste à quantifier ce potentiel et ainsi déterminer la valeur précise des différents contrôles/régulations qu'on peut appliquer à chaque équipement. En conséquence, dans le prochain chapitre, on analysera quelles stratégies de contrôle peuvent être appliquées aux différents équipements électriques résidentiels, pour ensuite déterminer quantitativement (chiffrer) le potentiel de chaque stratégie de contrôle selon différents points de vue.

Chapitre II - Méthodologie pour repérer des stratégies de contrôle dans les équipements électriques

Table de Matières – Chapitre II

2. Méthodologie pour repérer des stratégies de contrôle dans les équipements électriques	48
2.1. Analyse des langages de représentation graphique existants	49
2.1.1. Représentation d'une machine à laver par le langage GRAFCET.....	50
2.1.2. Représentation d'une machine à laver par le langage UML.....	55
2.2. Description du langage graphique proposé « Identification of load control availability » (ILCA).....	59
2.3. Principaux états de fonctionnement.....	62
2.4. Méthodologie d'application du langage graphique ILCA.....	63
2.4.1. Niveau utilisateur	63
2.4.2. Niveau constructeur.....	63
2.5. Application du langage ILCA à une machine à laver	64
2.5.1. Analyse niveau utilisateur – machine à laver	64
2.5.2. Analyse constructeur - machine à laver.....	68
2.6. Comparaison du langage ILCA et des autres langages de représentation graphique	76
2.7. Conclusion - développement de la méthode d'application ILCA.....	77

2. Méthodologie pour repérer des stratégies de contrôle dans les équipements électriques

Dans le chapitre précédent, on a pu identifier la disponibilité, voire l'aptitude, des différents équipements domestiques à agir sur les composantes de la demande électrique. Cependant on n'a pas exploité les différentes stratégies de contrôle qui peuvent être appliquées à chaque appareil.

Habituellement, les études pour quantifier la valeur d'un appareil en termes de réduction de leur consommation ou des appels de puissance se focalisent seulement dans quelques stratégies ou sur les stratégies les plus simples (normalement les stratégies les plus facilement identifiables), comme la coupure d'alimentation. Ces études donnent ainsi une vision incomplète de l'équipement analysé et non son vrai potentiel.

Avant de réaliser une étude de la quantification du potentiel de contrôle d'un équipement, il est important de repérer toutes les stratégies de contrôle qui peuvent être appliquées. A partir de ces stratégies, on garde les stratégies les plus intéressantes du point de vue de la réduction de la consommation et de la puissance, et qui peuvent être mises en oeuvre.

L'objectif de ce chapitre est de repérer les différentes possibilités de pilotage à distance et/ou différentes régulations possibles des équipements électriques. Ces modifications du fonctionnement normal résultent non seulement de la capacité à réaliser des économies d'énergie en changeant le mode de fonctionnement de l'appareil, mais aussi des possibilités de décalage ou d'arrêt temporaire de son fonctionnement.

Wood et Newborough [Wood & Newborough, 2006] ont étudié la manière dont l'information affecte les comportements des utilisateurs. Leur analyse est basée sur les « *micro behaviours* »¹⁰ et la recherche de la meilleure méthode pour influencer ces comportements. Une des questions fondamentales de leur étude est : quel type de comportement ou de contrôle peut être mis en place pour un appareil spécifique (pour économiser de l'énergie) ?

On peut diviser le potentiel de contrôle en deux catégories:

- Les stratégies de contrôle auxquelles l'utilisateur a accès
- Les stratégies de contrôle dites « invisibles » pour l'utilisateur et qui régissent le fonctionnement interne de l'équipement.

Ces deux analyses permettent de repérer dans un premier temps, les stratégies de contrôle pour lesquelles on a déjà une interface de communication et dans un deuxième temps des stratégies de contrôle plus avancées.

Pour pouvoir détecter les différents points de régulation de l'équipement et ensuite déduire des stratégies de contrôle, nous avons développé une méthodologie basée sur un langage graphique nommé « *Identification of load control availability* » (ILCA). Une première version de ce langage a été déjà publiée par Da Silva en 2011 [Da_Silva et al., 2011a].

¹⁰ - Des comportements distincts pendant un événement énergétique qui peuvent être conscients (avec information) ou inconscients (sans information).

L'avantage d'utiliser ce langage graphique c'est qu'il permet de décrire d'une manière simple et systématique les appareils électriques, en permettant ainsi de comprendre les différents modes de fonctionnement des équipements et leur courbe de charge. De plus, il permet de faire apparaître de manière simplifiée et claire les options de contrôle existantes des appareils. Dans un deuxième temps, ce langage permet de trouver des évolutions possibles, pour que les appareils électriques soient équipés de contrôles intelligents. Un autre point important, c'est la condensation de toute l'information sur le fonctionnement de l'équipement dans un graphique simple à lire et à construire.

Une application de ce langage est présentée en 2.5 et en 4.1 pour permettre au lecteur de comprendre la mise en place de toute la méthodologie.

Les langages existants ont été créés pour le développement de produit, l'automatisation de processus ou d'équipements ou le développement de logiciels entre autres. Dans notre cas, on ne veut pas décrire le fonctionnement de l'appareil avec tous ses objectifs, le but du langage présenté est seulement de mettre en évidence les options de contrôle d'une manière claire, rapide et intuitive. Ainsi, on a cherché à analyser si les langages existants répondent aux critères recherchés.

2.1. Analyse des langages de représentation graphique existants

Dans plusieurs domaines, on trouve souvent des analogies de représentation avec d'autres domaines. Par exemple, l'analogie des circuits électriques est habituellement utilisée pour la modélisation des phénomènes thermiques, mécaniques ou même magnétiques.

Les types de représentations graphiques existants ont été créés avec des objectifs précis pour pouvoir répondre à une exigence particulière, comme le développement de logiciels, automatismes, représentation de systèmes électriques et autres.

Dans notre cas, on cherche une représentation avec les caractéristiques suivantes :

- Représentation qui fait apparaître de manière simplifiée et claire les options de contrôle existantes des appareils ;
- Une représentation qui donne à l'utilisateur une certaine flexibilité dans la création des graphiques ;
- Le graphique doit être facile à construire et appliqué de forme systématique ;
- Les outils de la représentation graphique doivent être faciles à comprendre sans avoir besoin d'un apprentissage approfondi et exhaustif ;
- Représentation qui condense toute l'information du fonctionnement d'un équipement dans un graphique simple à lire et à construire.

On a cherché une possible analogie ou application des langages graphiques existants, notamment le Grafcet et l'UML. Ensuite, on analyse si ces langages permettent d'obtenir des représentations avec les objectifs définis auparavant. Dans les représentations suivantes, le cas d'une machine à laver est étudié comme exemple.

2.1.1. Représentation d'une machine à laver par le langage GRAFCET

Les équipements ont un fonctionnement normalement régi par des conditions logiques et séquentielles, et sachant qu'on cherche une représentation facilement compréhensible, un des langages existants permettant la représentation proche de nos objectifs est le Grafcet.

Le Grafcet est un langage normalisé, EN 60848 [gra, 2002], utilisé pour décrire des opérations séquentielles. Ce langage est utilisé par des concepteurs, des agents d'exploitation et de maintenance, et autres acteurs qui ont besoin de spécifier le comportement d'un système. Le processus est représenté comme un déroulement d'étapes reliées par des transitions. Les principaux éléments de ce langage sont :

- Etapes : « une étape caractérise un comportement invariant d'une partie ou de la totalité de la commande à un instant donné. Elle est utilisée pour définir la situation de la partie séquentielle d'un système » [Duméry, 2007].
- Transitions : « Indique la possibilité d'évolution d'activité entre deux ou plusieurs étapes. Cette évolution s'accomplit par le franchissement de la transition » [Duméry, 2007].

Plus d'informations sur les différents composants et règles de construction du langage Grafcet peuvent être trouvés dans différentes sources [Brenier, 2004] [Moreno & Peulot, 1996] [Duméry, 2007] [gra, 2002].

Ci après on présente la représentation graphique d'une machine à laver par le langage Grafcet.

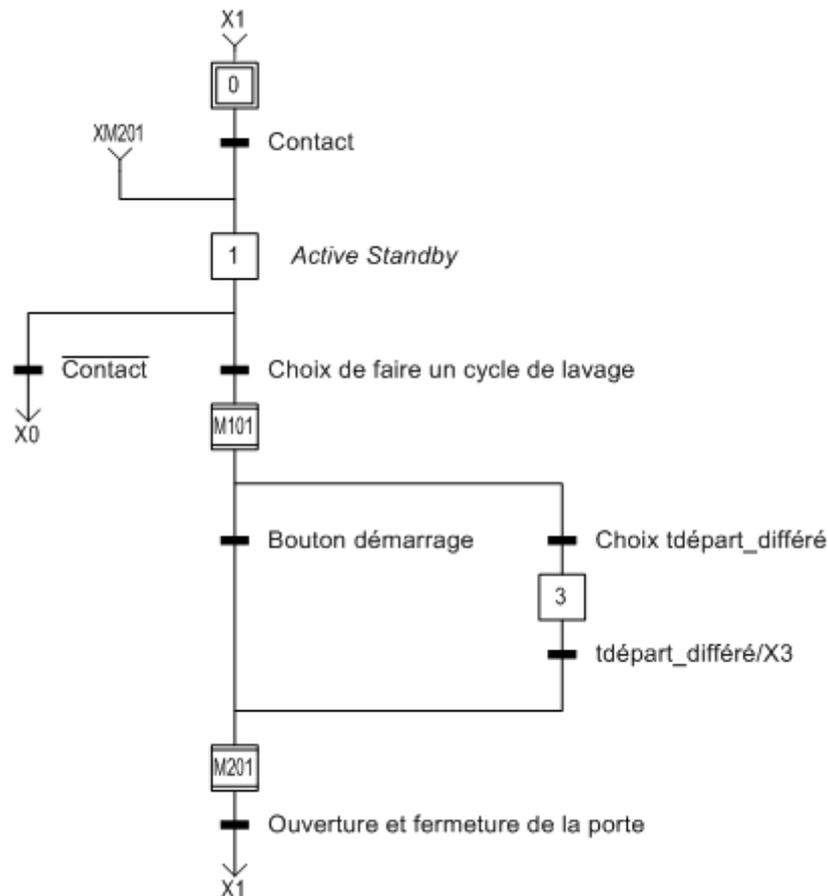
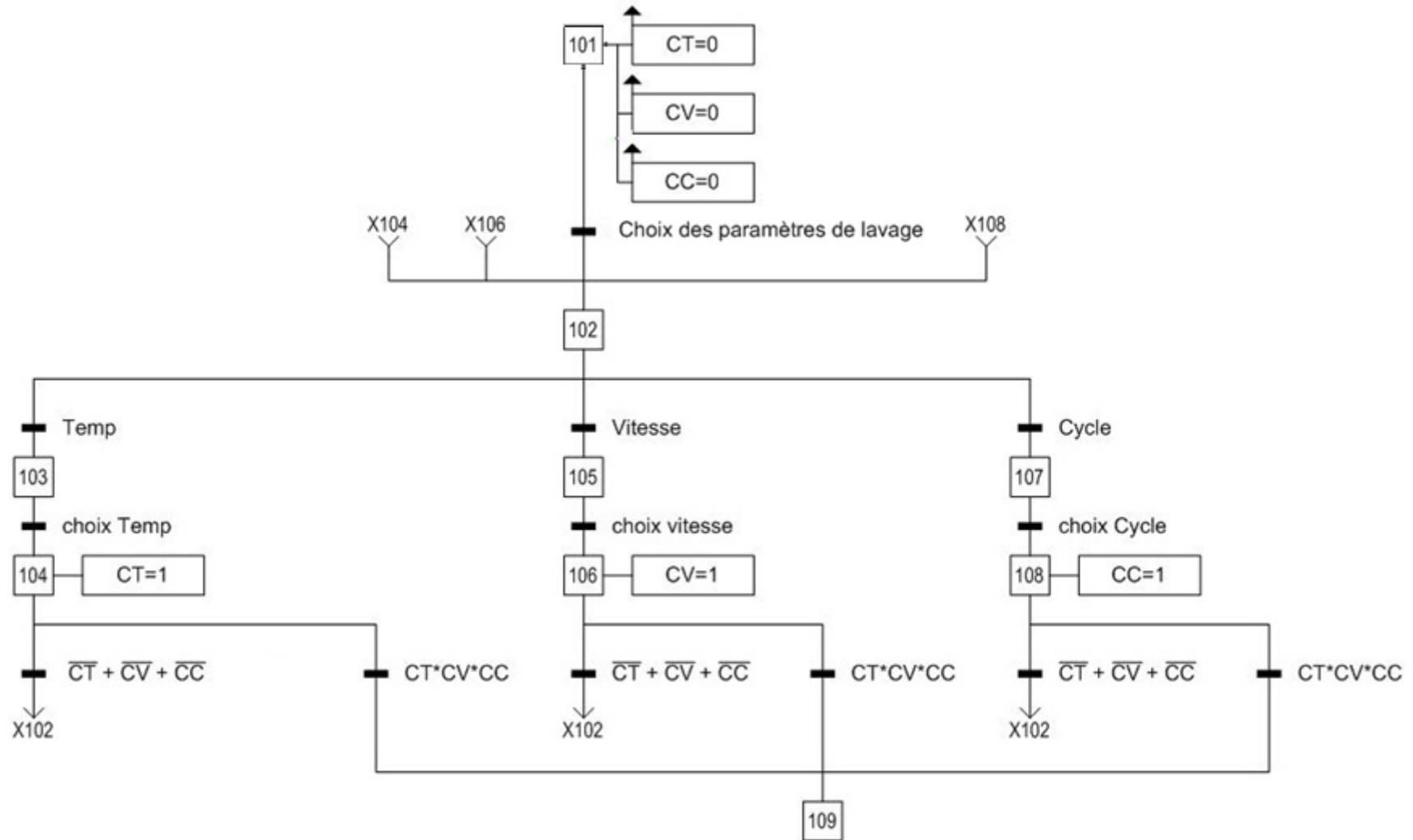


Figure 2-1 – Vue globale du fonctionnement d'une machine à laver – Grafcet

Le premier pas de l'utilisateur est l'allumage de la machine en appuyant sur le contact On/Off et la machine passe ainsi à l'étape « *Active Standby* ». Ensuite l'utilisateur fait le choix de réaliser un cycle de lavage, pour lequel il faut définir les paramètres de lavage. Le choix de ces paramètres se fait au niveau de la macro étape « M101 » qui est décrite dans la Figure 2-2.



Note : CT- Choix température ; CV- Choix vitesse d'essorage ; CC – Choix du cycle de lavage (programme)

Figure 2-2 – Choix des paramètres par l'utilisateur – Macro-étape 101

Au début de la macro étape on considère que les paramètres de lavage sont inconnus. Donc dans l'étape 101, ils sont mis à zéro. Après, pour représenter les choix des paramètres (température, cycle et vitesse d'essorage) il faut faire appel à une divergence du type « OU ». L'utilisateur va définir, par exemple, quelle température choisir indépendamment des autres paramètres et il peut changer la température choisie pendant le choix des paramètres de lavage.

Ainsi, si au moins un paramètre n'est pas validé par l'utilisateur le cycle reprend l'étape 102, pour effectuer le choix de ce paramètre ou changer un autre paramètre. Dès que tous les paramètres ont été choisis, l'étape 109 est activée.

En revenant sur la Figure 2-2, une fois choisie tous les paramètres de lavage l'utilisateur va démarrer le cycle de lavage. Il y a deux options, soit utiliser le bouton « Start » et démarrer directement le cycle de lavage, soit utiliser le départ différé. Si le départ différé est choisi, l'utilisateur définit le temps pour le départ différé et la machine reste dans l'étape 13 jusqu'au moment où le temps défini est dépassé.

Le cycle de lavage est décrit par la macro étape 201 (Figure 2-3).

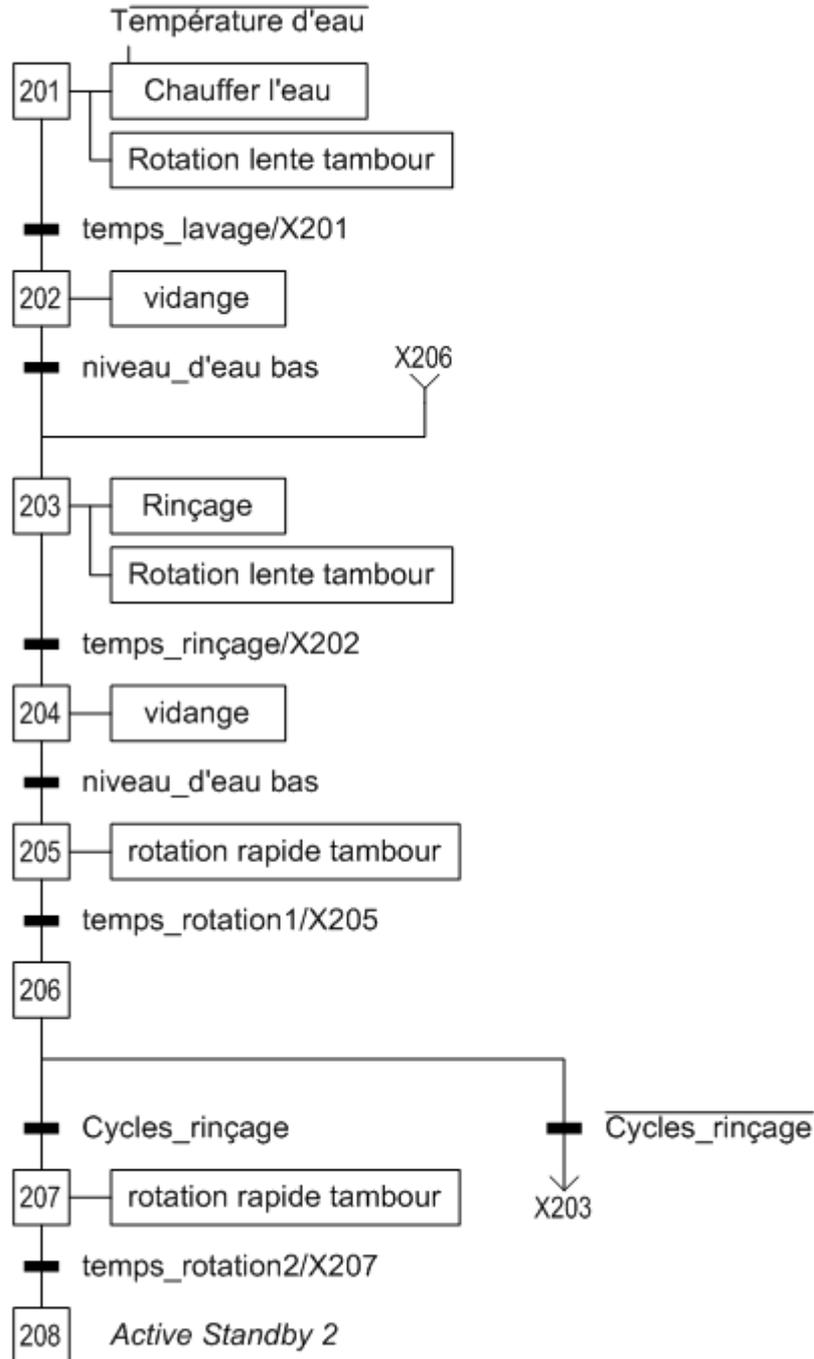


Figure 2-3 - description du cycle de lavage - macro-étape 201

Dans l'étape 201, la machine va chauffer l'eau pendant le temps où la température d'eau n'atteint pas la consigne définie par l'utilisateur, toujours couplé avec la rotation du tambour. Quand le temps de lavage est dépassé, l'étape 202 (vidange) est activée. Dès que le niveau d'eau arrive au niveau bas (eau évacuée), l'étape 203 (rinçage) est activée. Dès que le temps de rinçage est dépassé une nouvelle vidange est faite et ensuite le tambour va tourner à grand vitesse. Ce cycle de rinçage/vidange/essorage est répété tant que le nombre de cycles défini par le programme n'est pas franchi. Ensuite l'étape d'essorage est activée et le tambour va tourner à la vitesse définie par

l'utilisateur. Quand le temps de rotation pour l'essorage est dépassé la machine se met en « *Active Standby 2* ».

Après, dès que l'utilisateur ouvre et ferme la porte de la machine, l'étape 1 est activée et l'utilisateur peut réaliser un nouveau cycle de lavage ou éteindre la machine.

2.1.1.1. Discussion - Représentation Grafcet

Par définition, le Grafcet est un langage de formalisme simple pour la représentation des évolutions séquentielles d'un système. Il est compréhensible par les spécificateurs et les exploitants et il sert d'aide au développement du logiciel de contrôle [Duméry, 2007]. Ainsi, le Grafcet se présente comme un outil de communication privilégié entre les utilisateurs de systèmes automatisés et les concepteurs.

Cependant on peut voir que le langage Grafcet a eu besoin d'être découpé en plusieurs sous-représentations, car sinon la représentation aurait une dimension très grande.

A cause des types de liaisons et règles d'évolution du Grafcet, les graphiques deviennent plus difficiles à lire et interpréter, comme on l'a pu voir dans la Figure 2-2. Le langage Grafcet étant un langage séquentiel, il n'est pas conçu pour représenter sous forme claire les choix complexes de l'utilisateur vis-à-vis des opérations de fonctionnement de l'équipement.

Une autre particularité réside dans les modifications/arrêt du fonctionnement pendant le cycle de lavage. Pour permettre la représentation de ces transitions, il faut un Grafcet encore plus compliqué, car il faut ajouter des notes supplémentaires non prises en compte par la norme du langage Grafcet.

Ainsi le Grafcet ne correspond pas à tous les critères définis précédemment.

2.1.2. Représentation d'une machine à laver par le langage UML

Un autre langage permettant la description du fonctionnement des appareils électriques est l'UML (« *Unified Modeling Language* »). L'UML est principalement utilisé pour le développement efficace et rapide de logiciels cependant il peut être appliqué à d'autres domaines.

Le but de l'UML est de représenter un modèle d'un système à créer ou existant. Ce modèle est construit par un ensemble de diagrammes cohérents entre eux. L'UML se décompose en 13 types standard de diagrammes :

- Quatre diagrammes de vision dynamique : séquence, communication, global d'interaction et temps.
- Cinq diagrammes de vision statique : classes, objets, composants, déploiement, paquetages et structure composite.
- Trois diagrammes comportementaux : Cas d'utilisation, états-transition et activité.

La représentation par UML permet une certaine flexibilité en termes de précision de la représentation et il se base sur le fait qu'il est préférable de décomposer un système complexe en plusieurs petits modèles presque indépendants. Plus d'informations sur la description du langage UML peuvent être trouvés dans [Booch et al., 1998] et [Giroux, 2004].

Ensuite on montre l'application de ce langage à une machine à laver.

Pour pouvoir avoir une vue générale des interactions entre les différents éléments et leurs opérations on montre ci-dessous le diagramme de classes associé.

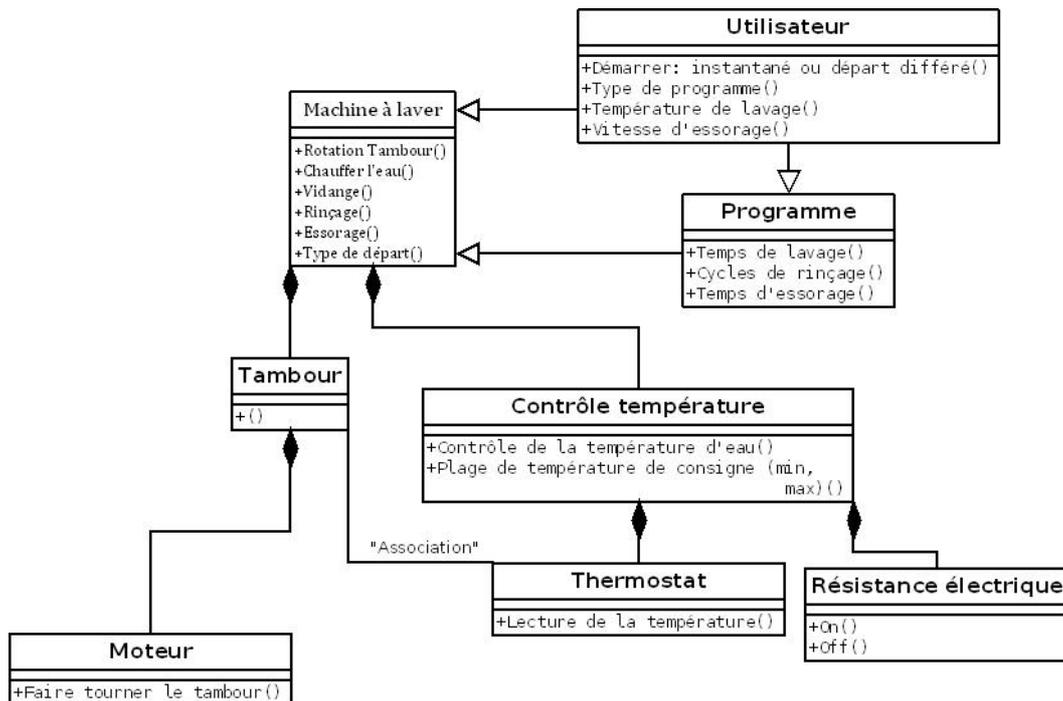


Figure 2-4 – Diagramme de classes d'une machine à laver

La Figure 2-4 montre les opérations de l'utilisateur vers le choix du programme comme d'autres caractéristiques du lavage. La machine à laver va effectuer différentes opérations qui seront contrôlées/réalisées par d'autres éléments comme le contrôleur de température ou le moteur. Dans ce diagramme, on trouve aussi des éléments de la machine comme le tambour, le thermostat ou la résistance électrique.

Pour mettre en évidence les itérations utilisateur-machine un diagramme de cas d'utilisation est représenté dans la Figure 2-5.

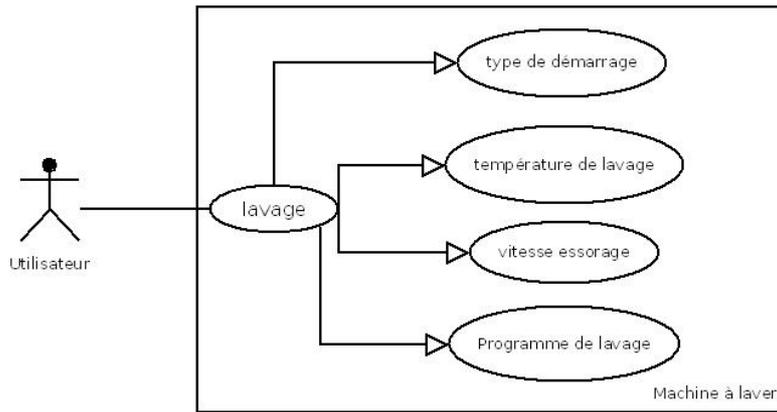


Figure 2-5 – Cas d'utilisation d'une machine à laver

La Figure 2-5 montre que l'utilisateur qui choisi de démarrer un cycle de lavage va devoir choisir aussi le type de démarrage (instantané ou départ différé), la température de lavage la vitesse d'essorage et le programme de lavage.

Ensuite pour représenter comment se déroule un cycle de lavage, on fait appel à des diagrammes d'état.

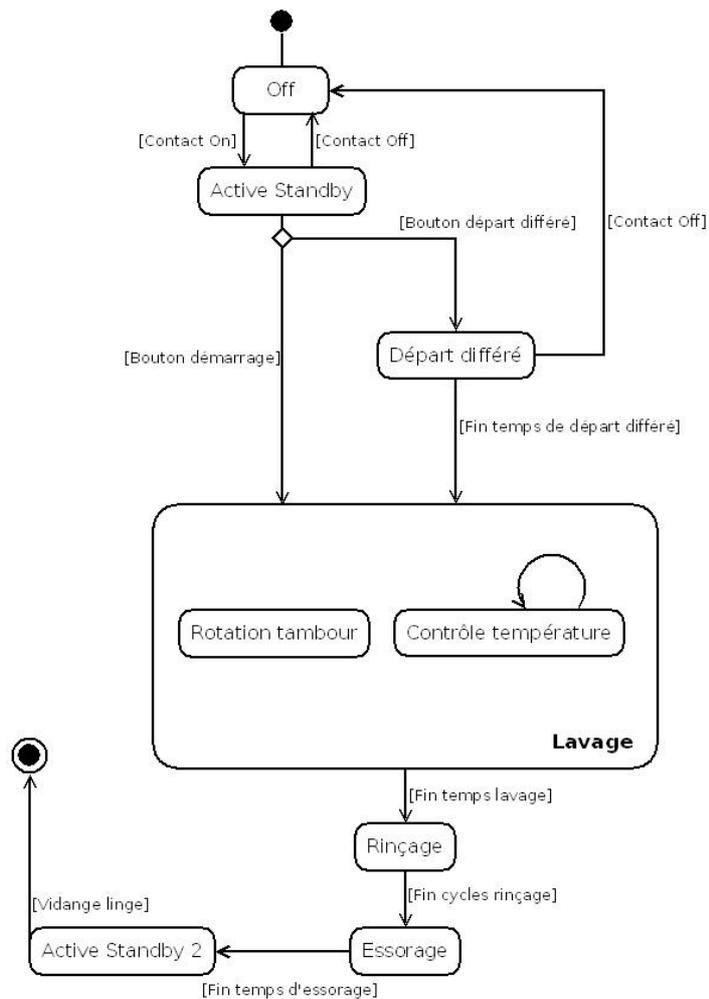


Figure 2-6 – Diagramme d'état global d'une machine à laver

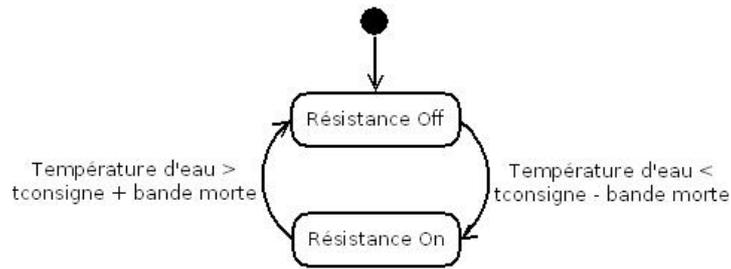


Figure 2-7 – Diagramme d'état du contrôleur de température

Les diagrammes d'état ressemblent beaucoup aux représentations Grafcet. Dès que le contact ON est activé, la machine passe à l'état « active standby » et ensuite la machine est démarrée, soit par départ différé soit par le démarrage direct du cycle de lavage. Si l'utilisateur appuie sur le contact ON/OFF quand la machine est dans l'état départ différé la machine passe à l'état OFF. Ensuite l'état de lavage comprend la rotation du tambour et le chauffage de l'eau. Le détail du contrôleur de température est montré dans la Figure 2-7.

Dès que le temps de lavage est dépassé, la machine fait le rinçage puis l'essorage. Une fois fini l'essorage, la machine passe à l'état active standby 2 et une fois le tambour vidé, le cycle de lavage est terminé.

Cependant, pour permettre de représenter l'effet de l'action de l'utilisateur sur le contact On/Off pendant les états de lavage, rinçage et essorage il faut faire appel à un diagramme d'état à historique (Figure 2-8).

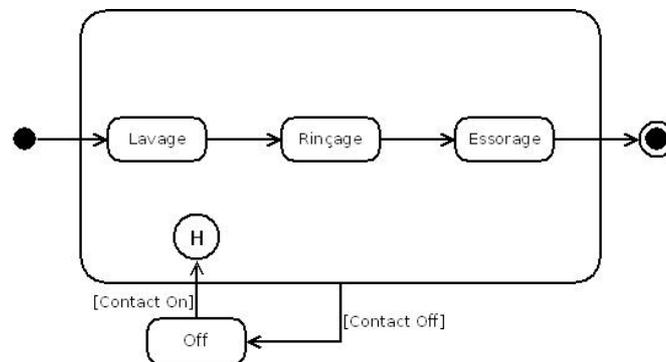


Figure 2-8 – Diagramme d'états à historique

Ainsi, à partir de la Figure 2-8 on peut déduire que, si la machine est arrêtée pendant un des trois états du lavage du linge (lavage, rinçage ou essorage), le moment où l'utilisateur appuie sur le contact On/Off est mémorisé pour que, une fois le bouton actionné de nouveau la machine reprenne le cycle où il a été arrêté.

2.1.2.1. Discussion - Représentation UML

Comme on a pu voir le langage UML permet de décrire le fonctionnement de la machine à laver d'une manière plus détaillée que le Grafcet. Le diagramme de classes n'était pas indispensable pour cette représentation mais on l'a présenté pour illustrer les différentes caractéristiques de ce langage car il montre les interactions/dépendances, sous une forme plus abstraite, que le diagramme d'état. Toutefois, il donne une connaissance approfondie des interactions entre les différents éléments.

Cependant un point doit être mis en évidence. Le fait que le langage nécessite une connaissance non négligeable pour comprendre les concepts intrinsèques des différents symboles et pour construire les représentations. Pour construire les représentations UML et bien les comprendre, l'utilisateur du langage UML doit avoir un minimum de connaissances en matière de conception orientée objet.

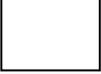
Le langage UML c'est montré beaucoup plus complet que le langage Grafset, cependant à notre avis elle reste très complexe pour qu'un acteur « *Smart Grid* » puisse comprendre et déduire les stratégies de contrôle de chaque équipement électrique.

Nous avons donc construit un langage spécifique pour répondre aux objectifs annoncés. On décrit les différents éléments de ce langage qui nous permettront de construire et d'analyser les différentes représentations tout au long de ce chapitre.

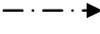
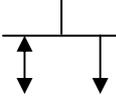
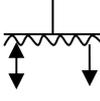
2.2. Description du langage graphique proposé « Identification of load control availability » (ILCA)

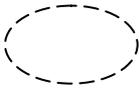
Avant toute mise en place du langage, on présente ci-dessous les définitions et les descriptions des différents éléments qui constituent le langage.

Tableau 2-1 - Définitions et descriptions des éléments du langage ILCA

Etat : On définit un état de fonctionnement comme une étape dans le processus de fonctionnement de l'appareil avec un objectif précis.	
<i>Symbole</i>	<i>Description</i>
	Ce symbole représente un état de fonctionnement de l'appareil. Les états de fonctionnement peuvent être statiques ou dynamiques (ex : modulation de puissance). Un état peut aussi contenir des sous-états. Un sous-état est un objet dans une étape où une ou plusieurs opérations peuvent être effectuées. (Exemple : état lavage d'une machine à laver voir 2.5.2).

<p>Transition : les transitions sont les éléments responsables du passage d'un état vers l'autre et/ou de la modification du fonctionnement d'un état. Elles peuvent être de simples transitions booléennes mais aussi des transitions plus complexes comprenant des équations ou des fonctions logiques.</p> <p>Note : Le passage d'un état à l'autre peut comprendre plusieurs transitions.</p>	
<i>Symbole</i>	<i>Description</i>
	<p>Ce symbole représente une transition simple. L'intérieur du rectangle doit contenir l'événement (règle booléenne, logique, à définir par le constructeur de la représentation) qui doit se produire pour avoir un passage d'une étape à l'autre. Exemples : un contact On/Off, un test logique, une valeur de la consigne du thermostat...</p>
	<p>Ce symbole représente une transition, <u>commune à plusieurs états</u>, son utilisation va permettre une simplification du graphique par l'élimination de liaisons ; évitant ainsi, la surcharge du graphique.</p> <p>Sa couleur rouge permet une identification plus rapide dans le graphique de ces transitions simplifiées. Ce symbole peut être utilisé avec des numéros, dans le cas où plusieurs applications différentes existent dans le même graphique (exemple : @1, @2...).</p> <p>La description de cette transition doit être décrite en bas du graphique.</p>

Liaison : éléments avec une ou deux directions, ils font la connexion entre les états et les transitions.	
<i>Symbole</i>	<i>Description</i>
	Ce symbole représente une liaison <u>avec intervention de l'utilisateur</u> , qui ne peut se produire que dans une direction.
	Ce symbole représente une liaison <u>avec intervention de l'utilisateur</u> , pouvant se produire dans les deux directions.
	Ce symbole représente une <u>liaison automatique</u> (contrôle interne de l'appareil) seulement dans une direction.
	Ce symbole représente une <u>liaison automatique</u> (contrôle interne de l'appareil) dans les deux directions.
	Ce symbole représente une liaison activée par la réception d'un signal à partir d'un réseau de communication. Cette liaison ne peut se produire que dans une direction.
	Ce symbole représente une liaison activée par la réception d'un signal à partir d'un réseau de communication. La liaison peut se produire dans les deux directions.
	Cette liaison représente une disjonction logique « ou ». Les flèches montrent si la transition se peut faire dans les deux sens (flèche à gauche) ou seulement dans un sens (flèche à droite).
	Cette liaison permet que deux ou plus transitions s'effectuent à partir d'une étape ou que deux ou plus étapes démarrent à partir d'une transition (pas forcément au même moment). Cette liaison peut aussi être utilisée pour faire converger des étapes ou transitions. Les flèches montrent si la transition peut se faire dans les deux sens (flèche en bas à gauche) ou seulement dans un sens (flèche en bas à droite).
	Liaison d'une variable externe (exemple : température extérieure, charges thermiques du bâtiment).

Paramètres externes : indiquent les paramètres externes au système analysé, qui vont avoir un rôle dans le fonctionnement de la machine (ex : Température d'eau, température d'air, etc.).	
<i>Symbole</i>	<i>Description</i>
	Ce symbole représente les variables externes ou variables contrôlées par l'utilisateur.

Possibles points de contrôle : l'objectif est d'indiquer les paramètres qui ont un impact sur le fonctionnement de la machine analysée.	
<i>Symbole</i>	<i>Description</i>
	Indique les endroits où le pilotage pourra être implémenté.

2.3. Principaux états de fonctionnement

Plusieurs études [Da_Silva & Rivière, 2010] [EuPLot6, 2006] ont identifié les états typiques de fonctionnement des équipements électriques.

Pour comprendre le fonctionnement des équipements depuis leur mode moins énergivore (équipement éteint ou état *Off*) jusqu'à leur fonction principale, les états de basse consommation (« *Low power modes* ») sont importants car ils permettent de comprendre les différentes étapes à suivre pour arriver à la fonction principale, donc les interactions de l'utilisateur vers la machine.

Ci après, on présente ces états et leurs définitions qui nous permettront de mieux comprendre leur fonction dans le fonctionnement des différents équipements électriques.

Off – Cet état se présente lorsque l'équipement est éteint. L'équipement reste branché au réseau mais il ne réalise aucune fonction et il ne peut transmettre ni recevoir aucune information. L'équipement attend une intervention physique de l'utilisateur (par l'intermédiaire d'un bouton on/off par exemple).

Dans ce mode, l'appareil peut pourtant consommer, une petite quantité d'énergie. Comme exemple dans le projet SELINA [Da_Silva & Rivière, 2010] sur 44 ordinateurs de bureau mesurés dans l'état *Off*, la moyenne de consommation a été de 2 Watt.

Passive Standby – dans cet état, l'équipement est dans un état de basse consommation énergétique (« *sleeping mode* », si télécommande ou affichage). La fonction principale de l'appareil n'est pas effectuée dans cet état.

Le « *Passive Standby* » peut habituellement comprendre les fonctions suivantes :

- Réactivation par contrôle à distance (« télécommande », qui ne doit pas être confondue avec *Network Standby*¹¹)
- Fonction continue :
 - Information ou écrans avec la description de l'état de l'équipement ou horloges
 - Capteur de sécurité
 - Senseur interne ou programmeur

Active Standby – Quand l'appareil est branché au réseau électrique mais qu'il n'exerce pas sa fonction principale (exemple : quand le contrôle par thermostat arrête la puissance électrique). Cet état est présent dans les cas suivants:

¹¹ -*Network Standby* : Mode qui permet la réactivation via un réseau de communication et/ou assure le maintien d'un réseau de communication.

- Quand une fonction mécanique n'est pas active (DVD *drive* ou moteur) alors que le circuit est allumé
- Quand l'appareil a une batterie qui est en train de se charger
- Quand l'appareil est dans un état non actif (exemple : amplificateur de son allumé mais sans aucun signal audio)

Delay Start – l'équipement peut être programmé pour un départ différé, dans quelques cas jusqu'à 24 heures.

ON – l'appareil réalise sa fonction principale

2.4. Méthodologie d'application du langage graphique ILCA

Le langage ILCA a deux objectifs différents avec deux niveaux de complexité différents : le *Niveau utilisateur* et le *Niveau constructeur*. C'est à l'utilisateur de cet outil de choisir le degré de détail de chaque niveau de représentation.

2.4.1. Niveau utilisateur

Le premier niveau est fondé sur les manuels d'utilisation des équipements et par l'expérience empirique de régulation/contrôle des équipements. C'est-à-dire qu'à partir de l'état où l'appareil est éteint, on construit la représentation en prenant en compte les options de contrôle visibles (accessibles) par l'utilisateur.

Le niveau utilisateur décrit le fonctionnement de l'équipement faisant appel seulement aux contrôles disponibles à l'utilisateur, ou par une liaison externe déjà existante. A partir de ces contrôles, le langage est construit à partir de l'état où l'appareil est éteint (ou moins énergivore). Ensuite, à partir des formalismes graphiques définis dans le point 2.2, on construit le reste de la représentation.

Une fois complétée la représentation, on identifie les points où le contrôle peut se réaliser, pour ensuite déduire des stratégies de pilotage simples, sans faire appel normalement à des équipements supplémentaires et/ou à des altérations dans les composants de l'équipement.

Dans ce sens, le niveau utilisateur du langage ILCA exploite les options de contrôle qui peuvent être mises en place principalement par l'utilisateur.

La mise en œuvre de ce niveau se fait en trois parties :

- i. Identification des processus d'interaction entre l'utilisateur et l'appareil
- ii. Construction de la représentation graphique
- iii. Déduction des formes possibles de réduction ou d'arrêt de fonctionnement, donc des stratégies de contrôle.

2.4.2. Niveau constructeur

L'objectif de ce niveau est d'identifier des stratégies avancées de contrôle. Ce niveau de description est orienté vers les constructeurs car les stratégies identifiées, dans ce niveau nécessitent normalement l'ajout de régulateurs supplémentaires, voir la modification des composants de l'appareil.

Il est basé sur des documents techniques et/ou des mesures pour comprendre les règles de commande de l'équipement analysé, faisant aussi appel à une certaine expertise des concepteurs. La représentation graphique de l'appareil est créée en prenant en compte tous ses états de fonctionnement et les règles de commande intervenant dans les processus de transition entre les différents états. A partir de cette représentation, une simplification est appliquée aux éléments les moins importants, en termes d'énergie et de puissance, seulement si ces éléments n'ont pas une relation avec les états plus importants.

Visualiser l'information complexe à partir d'un schéma structuré, relationnel et simple va permettre une compréhension plus rapide et une analyse des différents états de fonctionnement d'un appareil.

Ainsi, ce niveau est mis en œuvre en cinq étapes :

- i. Assemblage et étude des documents techniques et mesures existantes pour comprendre les règles de commande de l'équipement.
- ii. Identification des processus d'interaction entre l'utilisateur et l'appareil (si niveau utilisateur déjà analysé passer au point suivant).
- iii. Définition des éléments les plus importants de l'équipement en termes de consommation et de puissance.
- iv. Construction de la représentation graphique en appliquant des simplifications aux éléments des moins importants.
- v. Déduction des formes possibles de réduction ou arrêt de fonctionnement, i.e. déduction des stratégies de contrôle.

2.5. Application du langage ILCA à une machine à laver¹²

Ensuite, nous avons mené une analyse complète pour une machine à laver (niveau utilisateur et constructeur) de manière à explorer les différentes caractéristiques du langage.

2.5.1. Analyse niveau utilisateur – machine à laver

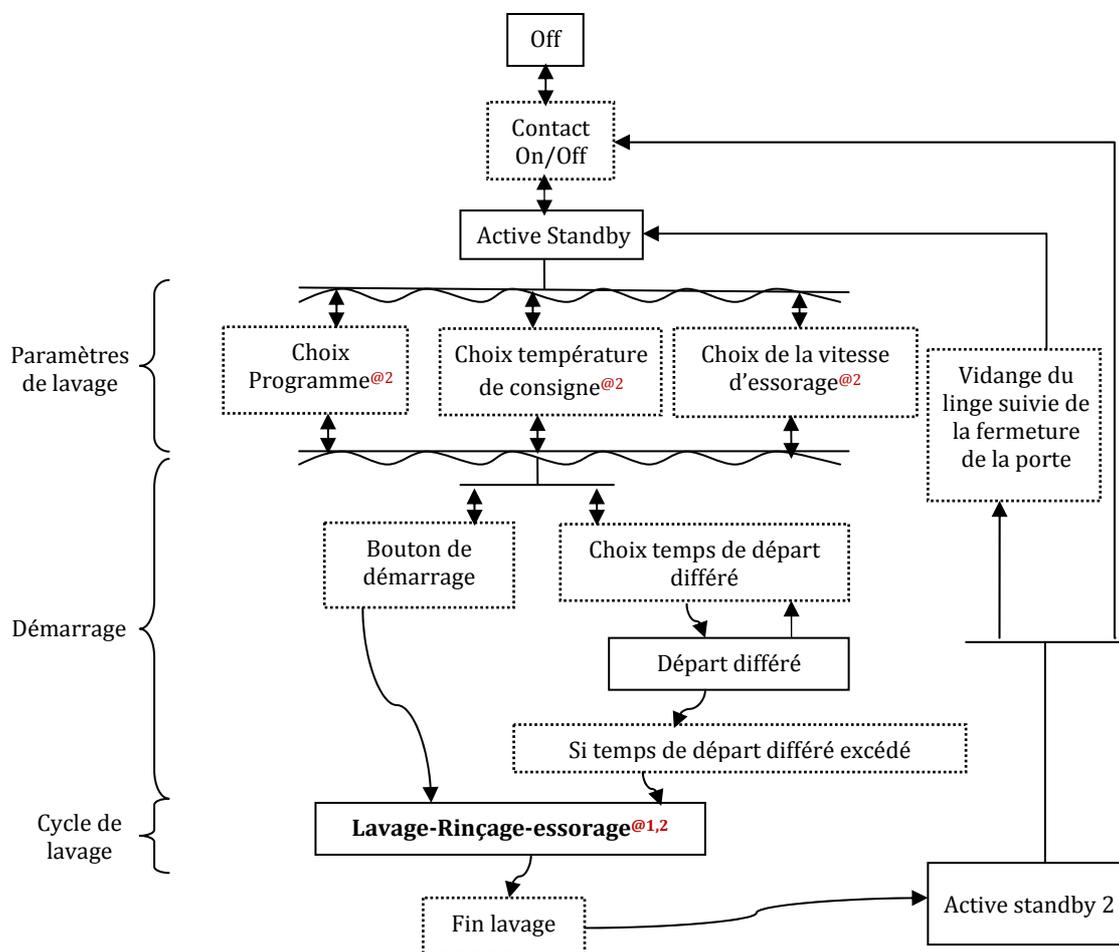
Pour le niveau utilisateur, on va chercher à déterminer seulement les modes de pilotage de l'équipement à partir des contrôles à disposition de l'utilisateur sans s'intéresser au cycle de fonctionnement « interne » de l'appareil.

A partir de l'expérience empirique et des manuels d'utilisation des machines à laver, on peut repérer les états de fonctionnement (décrits dans le Tableau 2-2) et les transitions entre ces états.

¹² -Note : Quelques machines à laver dans le marché pourront avoir des modes d'opération différentes du mode d'opération présenté.

Tableau 2-2 – Etats de fonctionnement d'une machine à laver - niveau utilisateur

Etats de fonctionnement
<i>Off</i> - l'appareil est débranché (mais il peut consommer de l'énergie)
<i>Active Standby</i> – L'appareil est allumé mais il ne réalise pas sa fonction principale. Il attend une action de l'utilisateur pour démarrer le cycle de lavage.
<i>Lavage-Rinçage-Essorage</i> – Cycle de lavage, comprend plusieurs étapes : lavage, rinçage et essorage
<i>Départ différé</i> – L'appareil attend que la durée défini par l'utilisateur soit dépassée pour initialiser le cycle de lavage.
<i>Active Standby 2</i> – Mode où l'appareil attend une action de l'utilisateur pour vider la machine. Dans ce mode quelques lumières peuvent clignoter et un signal sonore peut être activé.



@ 1– Si contact On/Off est coupé, l'appareil passe à l'état Off, mais garde en mémoire l'instant du cycle de lavage
 @2 – L'utilisateur peut toujours changer les paramètres de lavage, même quand le lavage est déjà commencé

Figure 2-9 – Représentation graphique de contrôle d'une machine à laver - niveau utilisateur

Dans un premier état l'appareil est « Off » (éteint). Des que l'utilisateur agit sur le contact On/Off, l'appareil passe à l'état « Active Standby ». Ensuite, il faut que trois transitions soient activées pour passer à l'étape suivante : Choix du programme, choix de la température de consigne et de la vitesse d'essorage. En réalité, ces trois transitions peuvent être parfois reprises du cycle précédent, car les

instruments de commande d'une machine à laver sont parfois mécaniques (normalement les sélecteurs, de température, du programme de lavage et de vitesse sont mécaniques). Cependant, le langage met en évidence les choix que l'utilisateur fait avant chaque cycle de lavage, même implicitement.

Une fois ces trois transitions activées, l'utilisateur peut démarrer le cycle de lavage directement (en appuyant sur le bouton démarrage) ou si la machine possède l'option de départ différé, activer cette option en choisissant le temps de retard. Si l'utilisateur a opté pour le départ différé, la machine va attendre, dans l'état *départ différé*, que le temps choisi par l'utilisateur soit dépassé pour démarrer le cycle de lavage. Pendant ce temps d'attente (départ différé), l'utilisateur peut le modifier voire éteindre la machine.

Il faut noter que l'utilisateur peut toujours revenir en arrière, c'est-à-dire changer les paramètres du lavage ou même éteindre la machine (voir sens des liaisons).

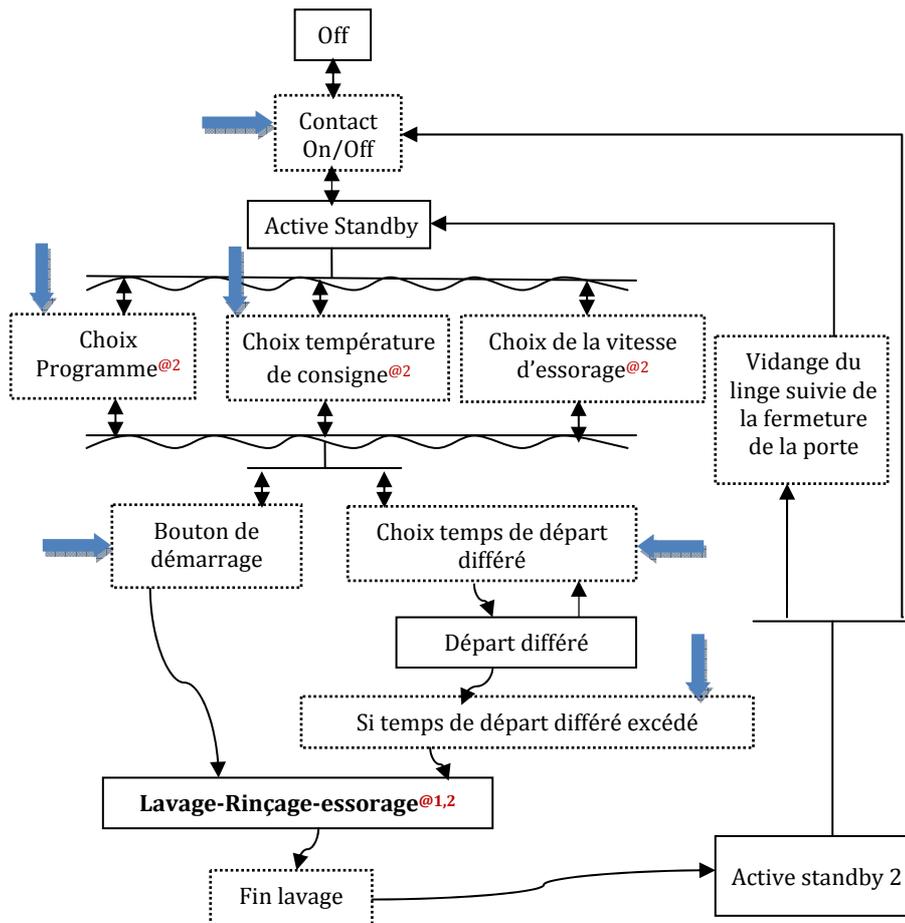
Une fois démarré le cycle de lavage, l'utilisateur peut dans certains cas avoir juste une information qui indique si le cycle est dans la phase de lavage, rinçage ou essorage, ou même le temps restant pour que le cycle soit fini, mais aucune autre information détaillée n'est normalement disponible. Si l'utilisateur appuie directement sur le contact On/Off dans l'état lavage-rinçage-essorage, la machine s'éteint mais garde en mémoire l'instant de lavage (information donnée par les notices de quelques machines à laver). Ainsi dès que l'utilisateur appuie sur le contact On/Off une fois de plus la machine revient dans l'état de lavage gardé en mémoire. Il faut noter aussi que l'utilisateur peut toujours venir en arrière et changer les paramètres de lavage.

Puis, à la fin du lavage, l'appareil se met en état « *Active standby 2* » où normalement un signal lumineux indique à l'utilisateur que le cycle de lavage est fini. Si le contact On/Off est enclenché, la machine passe directement à l'état Off. Sinon, dès que l'utilisateur fait le vidange du linge et ferme la porte, la machine à laver se met en « *Active Standby* » en attendant le démarrage d'un autre cycle ou de l'action de l'utilisateur sur le contact On/Off pour l'éteindre.

2.5.1.1. Stratégies déduites à partir de la représentation du niveau utilisateur

Pour déduire des stratégies de contrôle, il faut analyser les paramètres intervenant dans le fonctionnement de la machine qui peuvent être modifiés, pour arrêter, décaler ou réduire la consommation et/ou les appels de puissance.

Dans la représentation graphique suivante (Figure 2-10) on peut constater plusieurs points (Flèches bleues) où on peut agir et déduire des stratégies de contrôle:



@ 1- Si contact On/Off est coupé, l'appareil passe à l'état Off, mais garde en mémoire l'instant du cycle de lavage

@2 - L'utilisateur peut toujours changer les paramètres de lavage, même quand le lavage est déjà commencé

Figure 2-10 - Représentation graphique d'une machine à laver avec les possibles points de contrôle - niveau utilisateur

A partir de cette représentation (Figure 2-10), on déduit des stratégies de contrôle en analysant les effets sur le fonctionnement si une action se produit sur chaque point de contrôle et par la combinaison, si possible, de différents points de contrôle.

I. Action sur le contact On/Off

Arrêt/pause du cycle de lavage par action sur le contact On/Off. Cette stratégie permettra de réduire l'appel de puissance totale instantanément.

II. Choisir une température différente

Choisir une température plus basse aura comme résultat une plus faible consommation énergétique. Cette stratégie peut être appliquée pendant le choix des paramètres de lavage par l'utilisateur ou même pendant le lavage. Notons que l'application de cette stratégie pendant le cycle de lavage n'aura d'impact que si l'eau n'est pas encore chauffée.

III. Choisir un programme différent

Le choix d'un programme dit « ECO » consommera moins d'énergie.

Cette stratégie peut être appliquée pendant le choix des paramètres de lavage par l'utilisateur ou même pendant le lavage.

IV. Changer le temps de départ différé (action de l'utilisateur)

Selon l'étude [EuPLot14, 2007], seulement 32 % des machines en Europe ont l'option de départ différé et ce chiffre atteint 42% en France. Cette différence peut être expliquée par la diffusion massive des tarifs d'électricité du genre (TOU) « *Time of use* » en France. L'information sur les tarifs d'électricité dynamiques pourra donc être un facteur déterminant pour que les utilisateurs démarrent leur machine à laver aux heures où le tarif est le plus bas.

V. Modifier le temps de départ différé (commande externe)

Dans ce cas, une fois dans l'état « départ différé », le temps défini par l'utilisateur peut être modifié par une commande externe à la machine pour démarrer le cycle plus tôt ou plus tard.

VI. Action sur le bouton démarrage

Même principe que le départ différé mais dans ce cas le démarrage de la machine se fait manuellement. Néanmoins, il est plus difficile à mettre en place car il va demander un plus grand effort à l'utilisateur.

Dans quelques notices de machines à laver, le bouton démarrage peut avoir une double fonction : démarrer ou mettre le cycle de lavage en pause. Donc, dans quelques modèles, ce bouton peut être utilisé pour arrêter la machine comme si c'était une action sur le contact On/Off.

Les stratégies de contrôle mentionnées peuvent être utilisées dans le cadre des programmes de maîtrise de la demande électrique, sous la forme de conseils. Des programmes comme ECOWATT Bretagne [Réseau de transport d'électricité, 2011a] ou ECOWATT Provence-Azur [Réseau de transport d'électricité, 2011b], qui donnent des conseils sur comment décaler le fonctionnement des appareils électriques résidentiels pour les heures creuses, peuvent utiliser les stratégies proposées ici comme exemple.

Néanmoins, ces stratégies de contrôle peuvent servir aussi comme modèles à l'implémentation de contrôleurs pour la détection des heures pleines (Appareil intelligent ou « Smart Appliance »), où le tarif électrique est au plus haut, et ainsi modifier le fonctionnement de la machine à laver grâce à l'une des stratégies proposées.

2.5.2. Analyse constructeur - machine à laver

Pour pouvoir mener l'analyse *constructeur*, il faut examiner une documentation technique plus complète et si possible des mesures de la courbe de charge de l'appareil en fonctionnement, pour ensuite identifier les différentes phases du cycle de lavage.

D'après le projet du « Group for efficient appliances » [GEA, 1995b] le fonctionnement d'une machine à laver est basé sur trois étapes :

- i. Le fonctionnement de ces appareils est fait dans une première partie par l'entrée de l'eau et du détergent pour humidifier le linge avec rotation lente du tambour (pendant 15 minutes environ). Ensuite, l'eau est chauffée par une résistance. Le temps de chauffage va dépendre

de la puissance de l'élément chauffant de la machine (Résistance) et de la température choisi par l'utilisateur. La puissance de la résistance peut varier entre 1800 W et 2500 W.

Quand la température désirée est atteinte la résistance s'éteint et le lavage continue encore un certain temps. La partie « Lavage » consiste en plusieurs passages d'eau avec détergent et rinçages consécutifs couplés avec le mouvement rotatif du tambour. Parfois, après un certain temps la température baisse en-dessous de la limite fixée par le thermostat (cette limite dépend du type de thermostat utilisé) et la résistance peut être rallumée. Normalement les machines dites de « bas de gamme » et « gamme moyenne » sont équipées de thermostats mécaniques ON/OFF avec une précision d'environ 5/6°C et les machines de plus haute gamme sont normalement équipées de thermostats électroniques (PID) qui permettent une précision de 1°C.

- i. A la fin de la partie de lavage, le linge passe par plusieurs (3 ou 4 généralement) rinçages à l'eau froide, puis normalement à la fin de chaque rinçage le linge passe par un petit essorage. Dans le dernier rinçage est appliqué l'assouplissant.
- ii. Une fois finie la phase de rinçage, le linge passe par un essorage, où le tambour va tourner à grande vitesse (400 – 1600 tr/min) et ainsi retirer l'eau du linge.

Tout ce processus peut être contrôlé soit par un contrôleur électronique, soit par un temporisateur mécanique et il peut prendre entre 15 min et 3 heures.

Nous avons réalisé des mesures pour déterminer si on pouvait identifier ces différentes étapes dans la courbe de charge d'une machine à laver pendant son fonctionnement, mais aussi la puissance appelée dans chaque une de ces étapes.

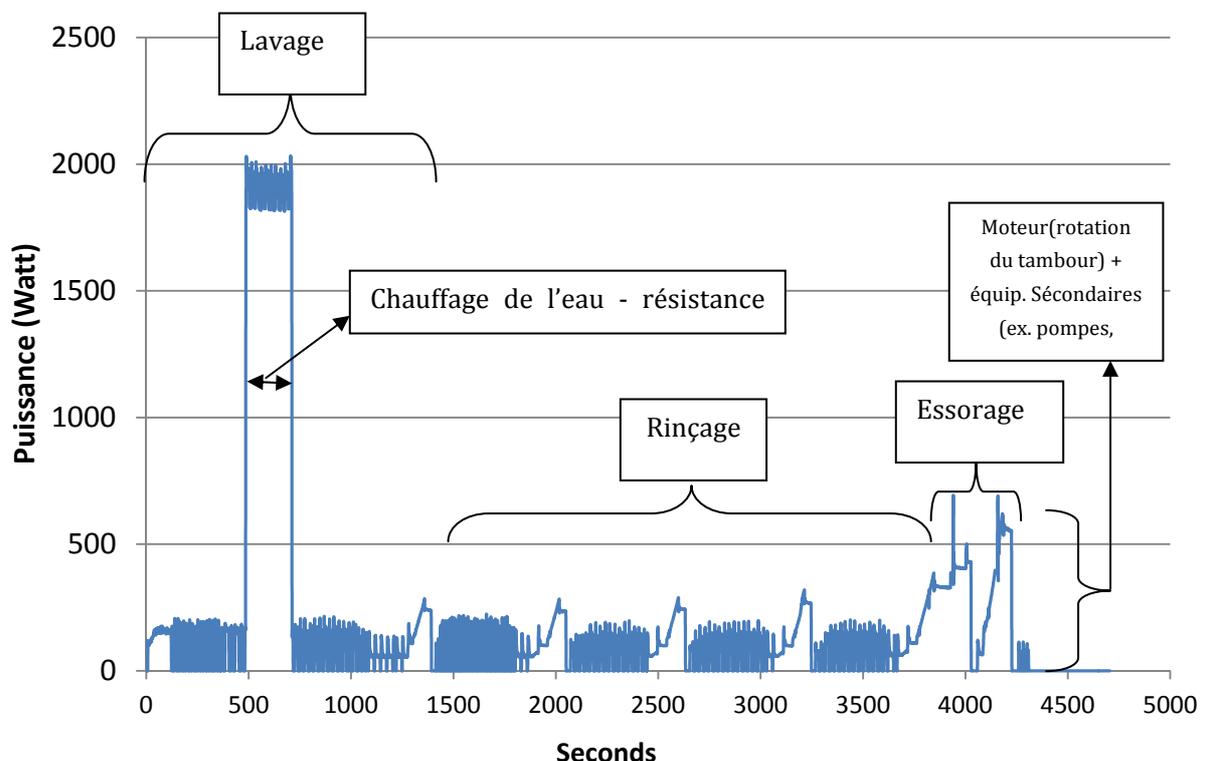


Figure 2-11 – Courbe de charge d'une machine à laver (cycle linge couleur à 30°C)

Comme on peut le voir d'après la Figure 2-11, on distingue facilement les différentes étapes de fonctionnement d'un cycle de lavage.

Pendant la phase de lavage, la résistance va s'allumer et une fois que la température atteint la consigne (Température choisie pour le lavage), la résistance est arrêtée et ainsi l'appel de puissance est fortement réduit. Après le lavage, 4 cycles de rinçage ont lieu et sont suivis par l'essorage.

La puissance nominale donnée par le fabricant était de 2000 W, mais en fait dans un programme à 30°C, le pic de consommation à 2000 W a une durée d'environ 4 minutes seulement. Pendant le reste du temps, la puissance appelée par la machine est d'environ 250 W (très différent des 2000 W).

L'énergie utilisée pendant tout le cycle est due principalement au chauffage de l'eau, selon l'étude menée par le *Group for Efficient Appliances* [GEA, 1995b] et dans nos mesures, cette énergie représente environ 80 % de l'énergie totale consommée (pour un cycle classique à 60°C).

A partir de toutes ces informations, on peut simplifier la représentation graphique. Comme on l'a vu, les états de vidange, rinçage et essorage jouent un petit rôle énergétique dans le cycle de lavage. Cependant, ces états restent essentiels à la qualité du cycle de lavage et surtout ils n'ont pas aucune liaison avec l'état de lavage. Donc, ces trois états ne représentent pas une vraie option pour le contrôle et ainsi on peut simplifier le graphique en se groupant ces trois états en un seul. En détaillant seulement l'état de lavage, on évite de surcharger la représentation et la déduction des stratégies de contrôle possibles devient plus facile.

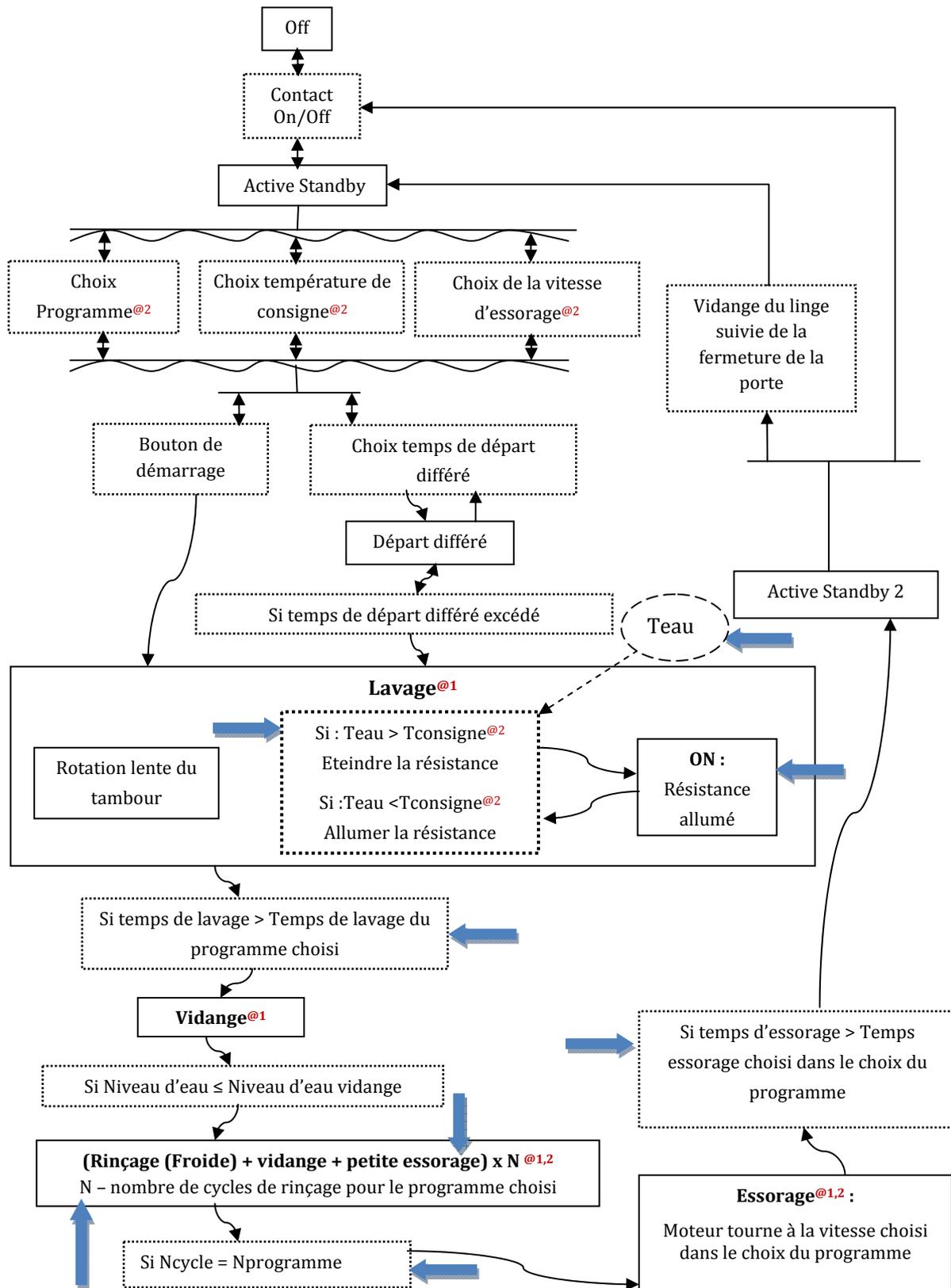
La nouvelle représentation (simplifiée) permet une meilleure compréhension des états les plus importants en termes de consommation et puissance, favorisant la déduction des stratégies de contrôle ayant un vrai potentiel.

Après cette description et analyse du fonctionnement de la machine à laver, on s'intéresse aux états de fonctionnement pour le niveau constructeur.

Tableau 2-3 – Etats de fonctionnement d'une machine à laver - niveau constructeur

Etats de fonctionnement
<p><i>Off</i> - l'appareil est arrêté (mais il peut consommer de l'énergie)</p> <p><i>Active Standby</i> – L'appareil est allumé mais il ne réalise pas sa fonction principale. Il attend une action de l'utilisateur pour démarrer le cycle de lavage.</p> <p><i>Lavage-Rinçage-Essorage</i> – Cycle de lavage, comprend plusieurs étapes : lavage, rinçage et essorage</p> <p><i>Départ différé</i> – L'appareil attend que la durée définie par l'utilisateur soit dépassée pour initialiser le cycle de lavage.</p> <p><i>Active Standby 2</i> – Mode où l'appareil attend une action de l'utilisateur pour vider la machine. Dans ce mode quelques lumières peuvent clignoter et un signal sonore peut être activé.</p> <p><i>Lavage</i> – Rotation du tambour continue ; introduction du détergent et après une phase d'environ 15 minutes (activation des enzymes), l'eau est chauffée jusqu'à température programmée.</p> <p><i>Rinçage</i> – Introduction d'eau froide couplée avec le mouvement rotatif du tambour suivi d'un petit essorage.</p> <p><i>Essorage</i> – Vidange de l'eau du tambour suivi d'une rotation rapide (Vitesse programmée).</p> <p><i>Active Standby 2</i> – Mode où l'appareil attend une action de l'utilisateur pour vider la machine. Dans ce mode, quelques lumières peuvent clignoter et un signal sonore peut être activé.</p>

Pour démontrer comment la simplification de la représentation graphique nous amène à une représentation plus compréhensible, il est présenté d'abord la représentation sans simplification et ensuite la représentation avec simplification.



@1 – Si contact On/Off est coupé, l'appareil passe à l'état Off, mais garde en mémoire l'instant du cycle de lavage

@2 – L'utilisateur peut toujours changer les paramètres de lavage, même quand le lavage est déjà commencé

Figure 2-12 - Représentation graphique d'une machine à laver - niveau constructeur sans simplification

Dans la première partie de la représentation jusqu'au démarrage du cycle, la représentation pour le niveau constructeur est la même que pour le niveau utilisateur, car ce sont essentiellement les mêmes contrôles.

La machine est allumée à l'aide d'un contact « ON/OFF ». Ensuite l'utilisateur choisit la température et le programme, ainsi que la vitesse d'essorage. Après ça, l'utilisateur démarre la machine en appuyant sur le bouton de démarrage. Toutefois l'utilisateur peut toujours opter pour le départ différé comme dans la représentation du niveau utilisateur.

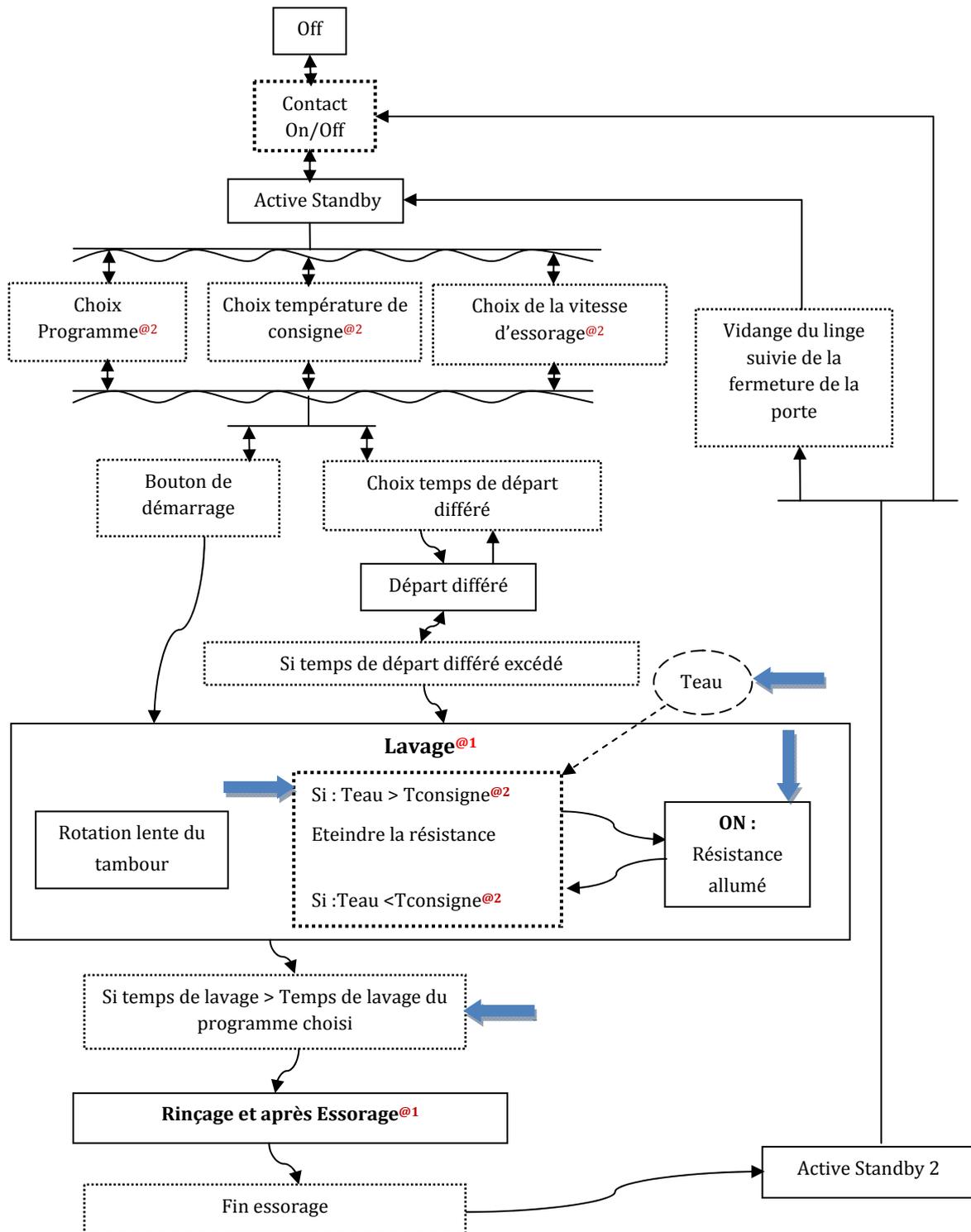
Une fois démarrée, la machine va introduire l'eau et le détergent, et le tambour commence à tourner lentement. Puis la résistance est allumée pour chauffer l'eau jusqu'à la température choisie par l'utilisateur antérieurement. La résistance est responsable du grand appel de puissance de ces équipements car il s'agit d'un système de chauffage d'eau instantané avec des puissances comprises entre 1800 et 2500 W (voir Figure 2-11).

Ensuite quand le temps de lavage est dépassé, la phase de rinçage commence. Cette phase consiste en une introduction d'eau froide dans le tambour toujours couplée avec le mouvement rotatif du tambour. A la fin de chaque rinçage le linge passe par un petit essorage. Le nombre de rinçages va dépendre de la machine et/ou du programme choisi.

Quand la phase de rinçage se finit, la machine passe à la phase d'essorage, où le tambour va tourner à une vitesse choisie par l'utilisateur (normalement comprise entre 800 et 1600 rpm).

Une fois terminée la phase d'essorage, la machine passe dans un mode normalement appelé « Active Standby 2 » où la machine attend le vidage du linge et l'arrêt de la machine ou le commencement d'un nouveau lavage.

Cependant comme on a pu le voir, l'état de lavage est l'état le plus important en termes de consommation et puissance. Donc une représentation simplifiée est possible selon la Figure 2-13.



@1- Si contact On/Off est coupé, l'appareil passe à l'état Off, mais garde en mémoire l'instant du cycle de lavage

@2 - L'utilisateur peut toujours changer les paramètres de lavage, même quand le lavage est déjà commencé

Figure 2-13- Représentation graphique d'une machine à laver - niveau constructeur avec simplification

A partir de la Figure 2-13, on peut constater que la représentation est devenue plus simple à comprendre et que les points, où l'on peut agir, ont été réduits à quatre au lieu de huit. La description des étapes de vidange, rinçage et essorage a été simplifiée à cause de leur faible impact énergétique et en puissance et à cause de l'absence d'une relation directe avec les états plus importants

(notamment l'état de lavage) qui empêche ainsi leur participation à une stratégie de contrôle pertinente.

2.5.2.1. Stratégies déduites à partir de la représentation du niveau constructeur

La représentation graphique nous donne directement les points où les contrôles peuvent être appliqués. Cependant pour déduire les stratégies de contrôle il faut combiner les informations des documents techniques et les différents points d'action de l'appareil analysé.

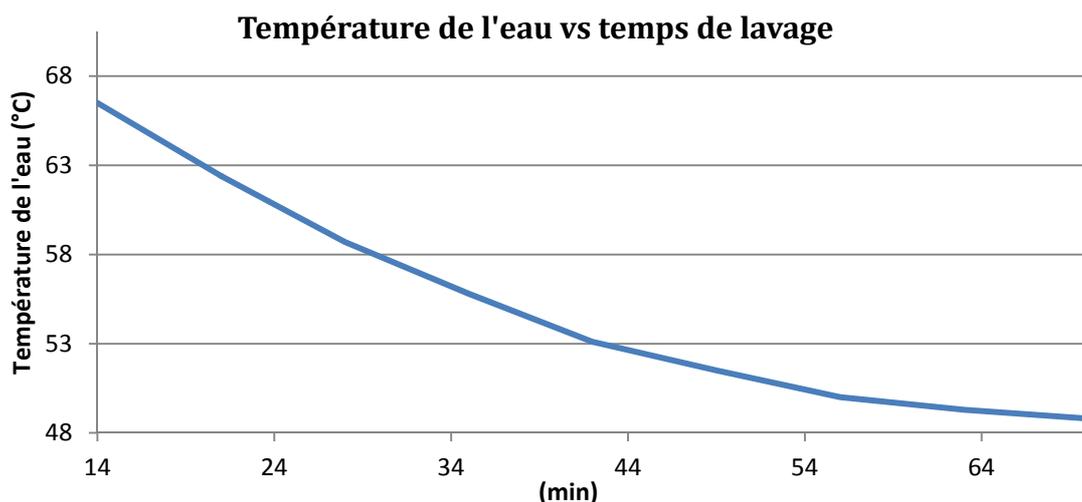
Les stratégies de contrôle recherchées ont comme but la réduction/interdiction des appels de forte puissance et de la consommation. A partir de la Figure 2-13 on peut constater plusieurs points où l'on peut agir et en déduire des stratégies de contrôle :

VII. Interdire l'allumage de la résistance électrique et arrêt du compteur du temps de lavage

On peut envisager l'interdiction d'allumer la résistance électrique pendant l'heure(s) de pointe électrique(s) (le temps d'interdiction pourrait être plus court). Le compteur du temps de lavage est alors arrêté mais pas le tambour. Ainsi, après l'heure de pointe la machine reviendra dans l'état où elle s'est arrêtée et le lavage sera réalisé dans sa totalité, sans induire d'abaissement de la performance du lavage.

VIII. Baisser la consigne et augmenter le temps de lavage.

La base de ce contrôle serait juste de baisser la consigne du thermostat (en dérogeant à la consigne choisie par l'utilisateur) de la température d'eau, mais la qualité du lavage serait affectée. L'étude du Group for efficient Appliances [GEA, 1995b] donne une corrélation entre la température de l'eau et le temps de lavage pour avoir la même qualité de lavage (Figure 2-14). Ce mode d'opération existe déjà dans quelques modèles en tant que programme « ECO ».



Source : [GEA, 1995b]

Figure 2-14 – Température de l'eau vs temps de lavage pour la même performance de lavage

La Figure 2-14 montre que, si on augmente le temps de lavage de 50 minutes (de 14 à 64 minutes), on peut réduire la température de lavage d'environ 15 °C, tout en gardant la même qualité de lavage. Sachant que le chauffage de l'eau est responsable d'environ 80% de la consommation mais

aussi du grand appel de puissance, cette réduction de la température de consigne peut avoir un impact significatif sur la consommation d'énergie et sur le temps que la résistance électrique restera allumée.

IX. Introduire de l'eau pré-chauffée par un autre élément (ex : chaudière à gaz, panneaux solaires,...) avec une source d'énergie différente.

Le remplacement de la source de chaleur éliminerait le besoin d'utiliser de l'électricité quand le réseau électrique est surchargé. Cependant, cette deuxième source de chaleur introduit un équipement supplémentaire et des contrôles additionnels pour réguler la température, la liaison et le débit d'eau de cette deuxième source.

2.6. Comparaison du langage ILCA et des autres langages de représentation graphique

Le langage ILCA a permis de répondre aux besoins que nous avons fixés comme nécessaires pour une déduction des stratégies de contrôle des équipements électriques plus accessible. On peut maintenant faire une comparaison entre les trois langages graphiques et relever les différences.

2.6.1. Discussion : Langage ILCA vs Grafcet

Comme on l'a vu au début de ce chapitre (en 2.1.1.1), à cause des types de liaisons et règles d'évolution du Grafcet, les graphiques deviennent plus difficiles à lire et interpréter. Comme on peut le voir en comparant les figures 2-15 et 2-16, la plus grande différence réside dans le choix/introduction des paramètres par l'utilisateur.

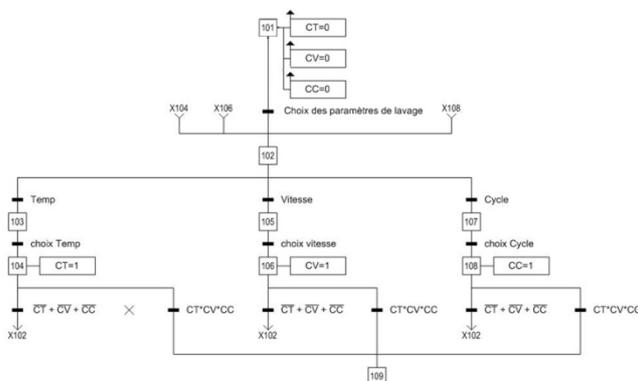


Figure 2-16 – Comparaison des choix des paramètres de lavage par l'utilisateur, Grafcet

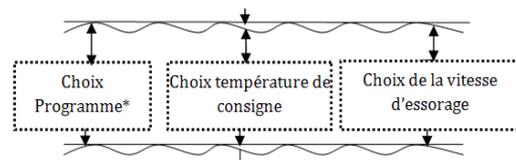


Figure 2-15 - Comparaison des choix des paramètres de lavage par l'utilisateur, ILCA

Le langage ILCA permet l'identification rapide des différents types de liaisons en donnant des symboles différents pour chaque type liaison : intervention de l'utilisateur, opération automatique et liaison d'une variable extérieure (voir 2.4).

Les différents niveaux de construction du langage ILCA (niveau utilisateur / constructeur) permettent un découplage méthodologique de la partie visible pour l'utilisateur et la partie invisible (niveau constructeur) du fonctionnement de l'appareil.

Une autre différence réside dans les modifications/arrêt du fonctionnement pendant le cycle de lavage. Comme on a déjà vu, pour permettre la représentation de ces transitions soit il faut un Grafcet encore plus compliqué, car il faut ajouter des notes supplémentaires non prises en compte par la norme du langage Grafcet.

2.6.2. Discussion : Langage ILCA vs UML

La grande différence c'est le fait que le langage UML nécessite une connaissance plus élevée que pour le langage ILCA, pour construire les représentations et les concepts intrinsèques des différents symboles.

Il faut noter que le langage ILCA ne cherche pas à remplacer le langage UML ni le Grafcet, mais à les compléter en permettant, même à une personne sans expérience en termes de représentation abstraite du fonctionnement des équipements, de représenter le fonctionnement d'un appareil (niveau utilisateur ou constructeur) et ensuite d'appliquer la méthodologie décrite en 2.4 pour déduire des stratégies de contrôle.

2.7. Conclusion - développement de la méthode d'application ILCA

On a identifié les caractéristiques qu'un langage graphique devrait posséder pour permettre une déduction simple et intuitive des stratégies de contrôle.

Ensuite, on a cherché une analogie possible avec des langages graphiques existants et on déduit que leurs représentations ne correspondaient pas à nos besoins. Le langage ILCA a été ainsi créé et décrit.

Une méthodologie basée sur la représentation graphique ILCA, pour repérer des stratégies de contrôle, a été présentée. Cette méthodologie se divise en deux niveaux permettant d'identifier des stratégies pour l'utilisateur de l'équipement ou pour un constructeur qui veut faire un « équipement intelligent ».

L'application de cette méthodologie à une machine à laver a permis de comprendre son modèle de fonctionnement sous une forme plus claire et de mettre en évidence le potentiel de la méthodologie.

Une comparaison entre le langage ILCA et les langages graphiques existantes a été menée. Cette comparaison a permis de mettre en évidence les lacunes existantes dans ces langages en termes de représentation simple et intuitive des points de contrôle.

Le langage ILCA permet une représentation simple et facile mais il permet aussi de condenser toute l'information importante en un seul graphique.

Les stratégies de contrôle déduites pour la machine à laver sont composées, en grande partie, par des arrêts temporaires du cycle de lavage ou le décalage de son fonctionnement. Dans ce sens, nous avons écarté dans le présent document une étude technique approfondie.

Chapitre III – Méthodologie d'évaluation de la flexibilité du chauffage électrique

Table de Matières – Chapitre III

3. Méthodologie d'évaluation de la flexibilité du chauffage électrique	80
3.1. Méthode d'évaluation des stratégies de contrôle pour le chauffage électrique	81
3.2. Analyse des outils de simulation dynamique du bâtiment existants	82
3.2.1. Modèles de réduction polynomiales	83
3.2.2. Optimisation des modèles thermiques	88
3.2.3. Techniques de transformation basées sur des variables d'état	88
3.3. Description du modèle de simulation du bâtiment mis en œuvre	89
3.3.1. Modèle de simulation de la conduction de chaleur à travers de la structure du bâtiment	94
3.4. Confort thermique des occupants.....	105
3.5. Procédure d'évaluation du contrôle du chauffage électrique	107
3.5.1. Définition des indicateurs pour l'analyse de la flexibilité.....	109
3.6. Conclusion – Méthodologie d'évaluation du chauffage électrique.....	112

3. Méthodologie d'évaluation de la flexibilité du chauffage électrique

Dans notre contexte, la flexibilité des équipements, vis-à-vis de la gestion de la demande électrique, peut être définie par les limites des stratégies de contrôle des appareils électriques pour répondre aux besoins du système électrique.

Pour cela, il faut quantifier les effets positifs et négatifs du contrôle des équipements, au niveau local (analyse d'une maison), mais aussi les effets globaux au niveau du réseau de distribution national associés à chaque stratégie. Ainsi on peut peser les avantages et les inconvénients dus à l'application de chaque stratégie de contrôle.

Les raisons de la mise en place de ces contrôles peuvent être de différentes natures. Dans notre cas, on s'intéresse à l'analyse de l'impact d'un contrôle dans différents cas :

- Action en situation d'urgence
- Contrôle fonction des besoins du réseau électrique (éviter les pics de consommation) à travers des signaux de prix ou des contrôles à distance

Dans ces différents cas, la marge de manœuvre dépend du climat, du type de bâtiment et des critères d'acceptabilité des occupants.

Dans le chapitre I, on a pu observer que l'usage ayant le plus large potentiel de gestion de la demande, en France, est le chauffage électrique. Cependant, la vraie valeur et les effets du contrôle des systèmes de chauffage restent indéfinis. L'objectif de ce chapitre est donc, de donner une méthodologie permettant de quantifier la flexibilité du chauffage électrique pour la gestion de la demande.

Plusieurs stratégies de contrôle ont été repérées lors de l'analyse des systèmes de chauffage électrique classiques (convecteurs/radiateurs électriques) par la méthode ILCA dans le chapitre précédent. Toutefois, le fonctionnement de ces systèmes dépend grandement de variables externes comme le climat et des caractéristiques qui interviennent dans le comportement thermique du bâtiment.

Dans ce chapitre, l'évaluation des stratégies de contrôle se fait à partir de modèles physiques, qui vont nous permettre d'étudier le comportement des équipements pendant leur fonctionnement normal et quand des stratégies de contrôle sont employées.

Le chauffage électrique et le bâtiment doivent être étudiés ensemble car les caractéristiques de ce dernier vont influencer grandement le fonctionnement du chauffage. Cette caractéristique est encore plus forte lorsque les équipements de chauffage n'ont pas une inertie importante. Dans les études techniques reportées au chapitre I, on a pu voir que plusieurs modèles de simulation ont été adoptés pour réaliser des études sur le contrôle des équipements. C'est pourquoi, on commence par une analyse des différents outils de simulation existants pour déterminer s'ils répondent à nos besoins de simulation.

Ensuite, un modèle de simulation du bâtiment + chauffage est construit. A partir de ce modèle on va pouvoir évaluer les stratégies de contrôle en prenant en compte l'acceptation de ces stratégies par les occupants.

Les critères d'acceptabilité du contrôle du chauffage électrique sont très dépendants des sensations de confort thermique ressenti par les occupants du bâtiment. Dans ce sens, on analyse les normes existantes portant sur le confort thermique. L'étude des normes permet de déterminer les critères de confort à respecter et ainsi déterminer les stratégies de contrôle qui restent acceptables par les occupants.

Pour conclure, un schéma de simulation est présenté pour comprendre les différents pas suivis dans notre analyse de la flexibilité. Différents indicateurs sont présentés pour la quantification et la comparaison des effets énergétiques. Des indicateurs de confort thermique seront aussi présentés pour quantifier l'impact des stratégies de contrôle du chauffage électrique.

3.1. Méthode d'évaluation des stratégies de contrôle pour le chauffage électrique

Pour pouvoir étudier comment un système va répondre à des changements de fonctionnement, des modèles physiques sont généralement utilisés. L'utilisation de ces modèles peut se faire selon deux voies différentes : utilisation des modèles directs ou des modèles indirects.

Les modèles indirects ou inverses, reposent sur la représentation du système réel à partir du comportement de ce dernier. Ce modèle est normalement basé sur la physique du système à représenter et sa paramétrisation est faite à partir de données obtenus sur site. Ainsi, on obtient un modèle permettant de décrire le comportement du système réel. Dans le chapitre I, on a pu voir plusieurs exemples d'application de cette technique de modélisation comme [Braun, 2003], [Braun & Chaturvedi, 2002] et [Braun et al., 2001].

Dans le cas des modèles directs, on utilise les valeurs théoriques pour les différentes variables comme la composition des murs, caractéristiques des fenêtres et autres.

Dans nos études on a opté pour des modèles physiques directs, faute de données sur le comportement de bâtiments. D'autre part, la modélisation directe nous permet une certaine liberté en termes de cas d'étude car on peut choisir une multitude de bâtiments très différents entre eux et ne pas rester limité aux bâtiments pour lesquels on a des données. A notre avis, les méthodes inverses sont plus utiles pour l'analyse de la gestion de la demande d'un bâtiment précis.

La détermination du modèle de simulation du bâtiment devient très importante dans le cas d'étude du chauffage électrique, car les caractéristiques du bâtiment vont influencer grandement la consommation du chauffage et les évolutions de température.

Pour l'étude de la gestion du chauffage électrique, il va falloir que le modèle thermique du bâtiment choisi permette de répondre à différents besoins. On énumère ces besoins :

- *Précision de calcul* - La méthode de calcul dynamique du bâtiment doit être précise en termes du calcul des besoins de chauffage mais aussi des évolutions de température, car la

température des murs et de l'air est un facteur déterminant pour l'évaluation de l'acceptabilité par les occupants.

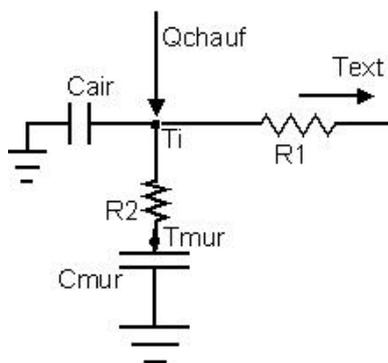
- *Calcul avec des petits pas de temps* – Pour pouvoir simuler le contrôle des systèmes de chauffage de façon réaliste un petit pas de temps est nécessaire. La simulation du fonctionnement du chauffage permet alors de suivre les appels de puissance du chauffage électrique et d'évaluer plus en détail les évolutions de température dans le bâtiment.
- *Temps de calcul* – Si un petit pas de temps de calcul est utilisé, le temps de simulation augmente car plus d'opérations mathématiques sont réalisées. Comme on veut étudier les impacts des stratégies de contrôle sur des groupes de bâtiments, sur toute la durée de la saison de chauffage, le modèle de simulation doit permettre des simulations rapides.

Différents échanges thermiques se produisent entre l'environnement et le bâtiment. D'un côté, on a la conduction à travers les parois, les vitres et de l'autre les échanges dus au renouvellement d'air (Ventilation et infiltrations). Il faut aussi prendre en compte les échanges entre les murs extérieurs et l'environnement et le rayonnement traversant les surfaces vitrées qui sera absorbé par les parois intérieures.

Avec l'objectif de choisir le modèle de simulation dynamique du bâtiment le plus adapté à nos besoins, on va d'abord s'intéresser à l'étude des modèles existants.

3.2. Analyse des outils de simulation dynamique du bâtiment existants

Des modèles très simples ont été développés, basés sur des analogies électriques, pour modéliser le comportement thermique du bâtiment. Un des modèles les plus simples, appelé de « *Equivalent thermal parameter (ETP)* », consiste en deux résistances et deux capacités pour représenter le bâtiment (Figure 3-1). Le grand avantage de ces modèles, c'est qu'ils sont très faciles à utiliser grâce au faible nombre de variables et équations employées. Ils sont généralement utilisés dans des modèles inverses car ces modèles ont peu de variables et sont donc faciles à identifier.



Avec :

Ti – Température intérieure [K]

Text – Température extérieure [K]

Qchauf - Chaleur fournie par le chauffage électrique [W]

R1 – Résistance représentant les échanges d'air – $1/U_{air}$ [W/K]

R2 – Résistance représentant les échanges thermiques par conduction des murs – $1/U_{mur}$ [W/K]

Cmur – Capacité des murs [J/K]

Cair – Capacité de l'air [J/K]

Figure 3-1 – Circuit électrique équivalent – « ETP »

D'autres modèles ont été développés dans lesquels chaque paroi est décomposée en deux ou trois résistances et capacités pour une meilleure précision comme dans [Mendes et al., 2001]. L'air est très souvent représenté par un nœud auquel une capacité est associée. Ainsi la température de ce nœud (Température d'air) est équivalente à la température moyenne d'air dans la pièce, ou du bâtiment.

Pour calculer les échanges radiatifs entre les parois, ces modèles simplifiés utilisent souvent un coefficient d'échange global. Ce coefficient comprend les échanges radiatifs et convectifs, donc le

nœud d'air du modèle devient une moyenne de la température radiante des parois et de la température d'air. On peut dire dans ce cas que la température d'air correspond à la température opérative de la pièce. Comme la régulation du chauffage électrique est basée sur la mesure de la température d'air et non sur la température opérative, le contrôle du chauffage électrique ne sera pas décrit correctement si un coefficient d'échange global est pris dans nos simulations.

Cependant, ces modèles ne calculent pas les évolutions de la température des murs, car ils considèrent que tout le mur est à température constante ou qu'il a deux, maximum trois, températures différentes. Des études menées par Kummert [Kummert, 2001] montrent qu'il existe une erreur de calcul non négligeable de la température de la surface des murs avec ces modèles par rapport à un modèle de référence où les parois sont construites par la méthode des différences finies.

Les modèles de différences finies ont une très bonne précision, mais ils impliquent la résolution d'un grand nombre d'équations, ce qui augmente beaucoup le temps de simulation.

Plusieurs auteurs proposent des réductions d'ordre pour réduire les temps de calcul. Selon Gouda [Gouda et al., 2002] on peut regrouper les méthodes de réduction d'ordre en trois catégories:

- **Méthodes de réduction polynomiales**
- **Optimisation des modèles thermiques**
- **Techniques de transformation basées sur des variables d'état**

3.2.1. Modèles de réduction polynomiales

Les réductions polynomiales sont généralement appliquées dans le domaine fréquentiel. Elles permettent de trouver des fonctions de transfert qui remplissent les critères liés au comportement du bâtiment.

Une de ces méthodes de réduction est présentée par Stephenson et Mitalas [Stephenson & Mitalas, 1974] et dans les travaux de Seem [Seem, 1987]. Elle permet le calcul rapide et précis du transfert de chaleur à travers des structures. Cette méthode nommée « *Conduction transfer functions (CTF)* » consiste en l'utilisation de fonctions de transfert et de facteurs de réponse pour résoudre des problèmes de transfert transitoire de chaleur, quand les caractéristiques du bâtiment sont constantes au cours du temps. Les parois sont donc modélisées selon des séries temporelles (Equations 3-1 et 3-2) dans lesquelles les flux de chaleur et les températures des surfaces sont évalués à des pas de temps égaux.

$$q_{ki}''(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{ng} \Phi_j q_{ki,t-j\delta}'' \quad (3-1)$$

$$q_{ko}''(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{ng} \Phi_j q_{ko,t-j\delta}'' \quad (3-2)$$

Avec,

$\dot{q}_{ki}(t)$ - Flux de chaleur par conduction à la surface intérieure

$\dot{q}_{ko}(t)$ - Flux de chaleur par conduction à la surface extérieure

X_j - coefficient CTF extérieur

Y_j - coefficient CTF interne

Z_j - coefficient CTF intérieur

T_i - Température de la surface intérieure

T_0 - Température de la surface extérieure

Φ_j - coefficient CTF du flux de chaleur

δ - Pas de temps du calcul de la fonction de transfert

L'indice « 0 » dénote le premier terme de la série

n_z - nombre de coefficients de la série temporelle des températures

n_q - nombre de coefficients de la série temporelle des flux de chaleur

Ces équations expriment le flux de chaleur à chaque surface de la paroi en fonction des températures des surfaces (intérieure et extérieure) actuelles et des pas de temps précédents et des flux de chaleur des pas de temps précédents. Avec une seule et relativement simple équation linéaire, à coefficients constants, le flux de chaleur à travers d'une paroi peut être calculé.

Les coefficients de la CTF peuvent être calculés selon trois méthodes : « *Direct root-finding* », « *State-Space method* » ou « *Frequency domain regression* ».

Les logiciels de modélisation du bâtiment les plus répandus, TRNSYS [Solar Energy Laboratory, 2000] et EnergyPlus [ene, 2006], utilisent la méthode « *State-Space method* » pour calculer les coefficients CTF, donc on a analysé cette méthode plus en profondeur.

L'expression du modèle d'état de la paroi (Equation 3-3 et 3-4) relie les températures aux flux de chaleur intérieurs et extérieurs à chaque nœud de la paroi. On utilise les méthodes de différences finies ou d'éléments finis pour discrétiser les équations de transfert de chaleur.

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_1}{dt} \\ \frac{dT_2}{dt} \\ \vdots \\ \frac{dT_n}{dt} \end{bmatrix} = A \underbrace{\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix}}_x + B \underbrace{\begin{bmatrix} T_i \\ T_0 \end{bmatrix}}_u \quad (3-3)$$

$$\begin{bmatrix} q''_i \\ q''_0 \end{bmatrix} = C \underbrace{\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix}}_x + D \underbrace{\begin{bmatrix} T_i \\ T_0 \end{bmatrix}}_u \quad (3-4)$$

Les coefficients des matrices A, B, C, D dépendent des propriétés des matériaux de la paroi. Les variables T_1, T_2, \dots, T_n représentent les températures aux nœuds, n représente le nombre total de nœuds, T_i et T_0 représentent notamment la température interne et extérieure, q''_i et q''_0 sont les flux de chaleur interne et externe (généralement les sorties désirées).

Ce système d'équations est résolu, selon la méthode présentée par Seem [Seem, 1987] pour ensuite trouver les coefficients CTF.

Pour pouvoir modéliser la dynamique du fonctionnement du chauffage électrique et évaluer le confort des occupants d'une manière plus fine, il faut descendre à des pas de temps d'une minute, voire des pas de temps encore plus faibles.

Quand on utilise des petits pas de temps (1minute par exemple) les coefficients CTF deviennent plus petits et l'influence de chaque coefficient devient plus faible sur la sortie du système. De ce fait, pour des simulations avec des pas de temps courts, on a besoin d'un plus grand nombre de coefficients CTF pour décrire le bon comportement de la paroi. Dans des structures massives, à cause de leur plus grande inertie le nombre de coefficients CTF doit être encore plus grand. Comme les coefficients ont des valeurs déjà très petites, avec l'augmentation de leur nombre due au petits pas de temps, à partir d'un certain niveau les coefficients CTF deviennent difficiles à calculer car ils deviennent très petits.

Ainsi, à cause des erreurs de troncature et d'arrondi [Taylor et al., 1991], [ene, 2006], la précision de cette méthode diminue au fur et à mesure que le nombre des coefficients CTF augmente et le pas de temps de calcul diminue. Avec des petits pas de temps « δ » les séries de coefficients CTF deviennent plus instables et la simulation finit par diverger.

Pour contourner ce problème des pas de temps suffisamment grands sont utilisés (minimum 15 minutes jusqu'à 2, 3 heures pour des structures massives [ene, 2006]) pour garder la précision. Pour connaître les températures de surface et les flux de chaleur entre deux pas de temps « δ », des interpolations sont faites. Cependant ces interpolations ne sont pas adaptées à la simulation du comportement des systèmes CVCA (Chauffage Ventilation et Climatisation d'air) où leur réponse dépend fortement de l'interaction bâtiment-système CVCA.

Un de ces effets peut être observé dans la figure ci-dessous, que nous avons obtenu en essayant de simuler une coupure de chauffage à l'aide du logiciel TRNSYS :

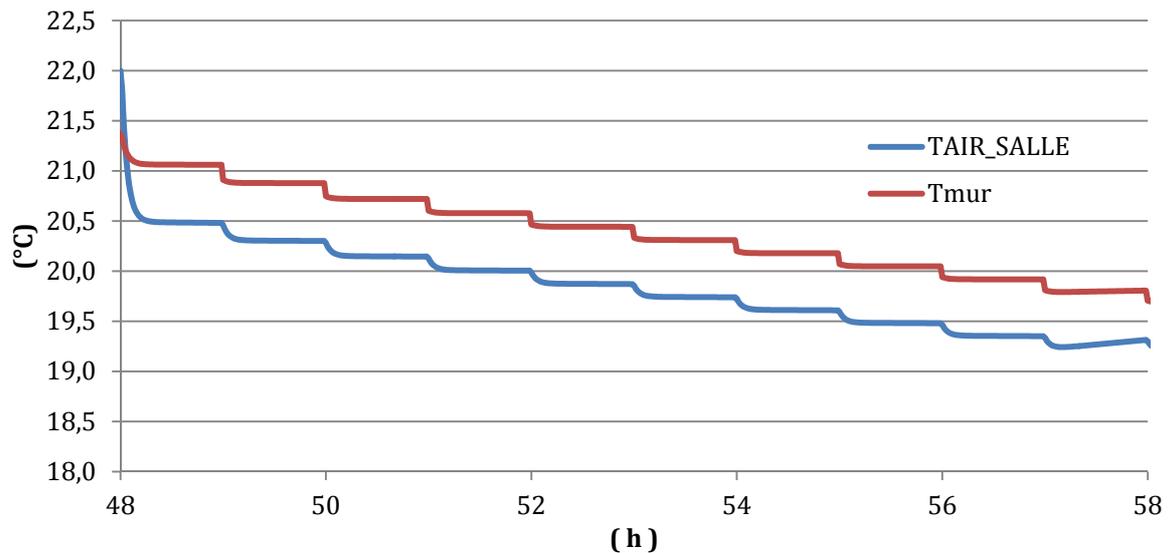


Figure 3-2 - Effet escalier dû à l'utilisation d'un faible pas de temps de simulation (avec $\delta = 1$ h)

La Figure 3-2 montre l'évolution de la température dans une pièce suite à une coupure du chauffage électrique, pour un pas de temps de simulation d'une minute et un pas de temps δ égal à une heure. Au début de chaque heure, les coefficients CTF sont mis à jour, donc les températures et les flux de chaleur des pas précédents qui entrent dans le calcul changent (sont décalés de δ). Ce changement va entraîner une altération du flux calculé, et donc la température de la surface du mur va elle aussi changer. La température devient presque stable puis elle est calculée à partir d'interpolations selon Taylor [Taylor et al., 1991].

Comme on peut le voir, ces évolutions de température ne permettront pas de simuler le comportement du chauffage électrique, ni d'évaluer correctement le confort thermique avec un pas de temps infra-horaire.

Un autre problème dû à l'utilisation d'un pas de temps de simulation inférieure à celui du calcul des flux de chaleur à travers les parois apparaît dans le calcul des besoins de chauffage ou de climatisation d'un bâtiment. La figure suivante montre les résultats de simulation, en besoins, pour un bâtiment tertiaire avec une consigne de température d'air constante (6-20 h), avec un pas de temps de simulation d'une minute et un pas de temps δ d'une heure.

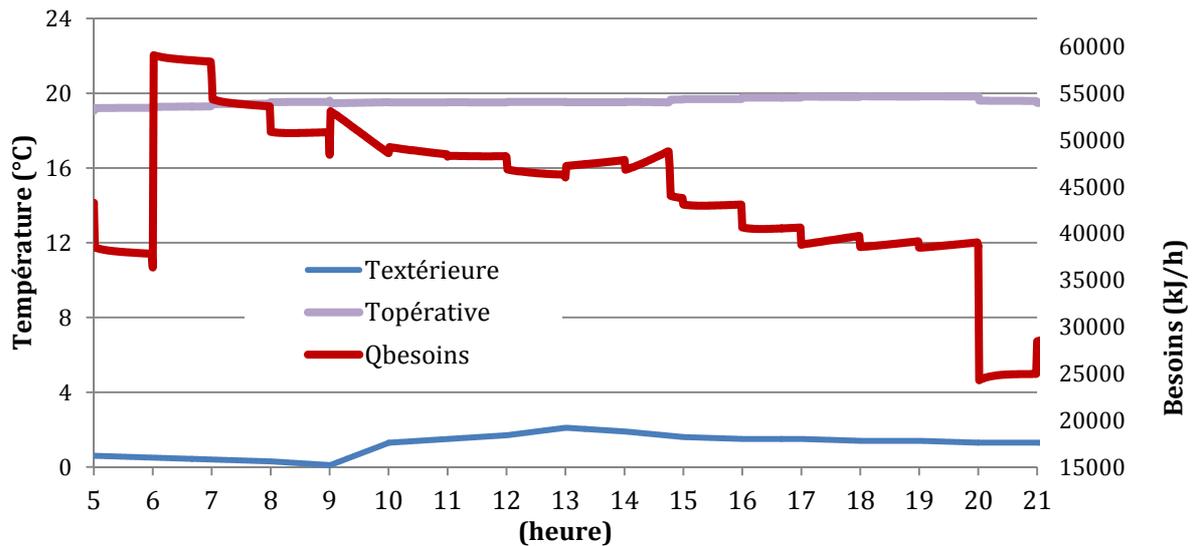


Figure 3-3 – Effet sur le calcul des besoins de chauffage avec un faible pas de temps de simulation et $\delta=1h$

L'évolution de la courbe de besoins ne présente pas un comportement continu. A la fin de chaque heure, le calcul des nouveaux flux de chaleur va créer des évolutions avec des sauts à la fin de chaque heure, pour les températures des surfaces et pour le calcul des besoins.

Dans l'une de nos premières études menées sur la gestion de la demande [Da Silva et al., 2010], nous avons réalisé une évaluation des stratégies de contrôle appliquées à des climatiseurs individuels dans un bâtiment tertiaire. Dans cette étude, nous avons utilisé un modèle de TRNSYS pour calculer les consommations des climatiseurs en fonction des besoins de climatisation.

Pour pouvoir calculer les appels de puissance et évaluer l'inconfort généré par l'application des stratégies de contrôle, un pas de temps d'une minute a été utilisé. A cause du comportement en escalier des besoins et de la température (Figure 3-3), on s'est aperçu que les résultats ont été faussés, en termes d'appels de puissance et en termes d'inconfort. Cette étude est présentée dans l'Annexe II.

Le logiciel TRNSYS reste toute de même précis pour des calculs de consommation [Taylor et al., 1991]. Avec l'objectif d'évaluer des effacements du chauffage électrique seulement en termes de consommation, on a étudié la possibilité d'un couplage de TRNSYS avec un autre modèle pour décrire l'évolution de la température opérative intérieure.

Un des objectifs de ce modèle a été de permettre d'évaluer le confort thermique. Le modèle avait aussi comme objectif de donner un outil d'évaluation du confort applicable lors des coupures du chauffage électrique.

Les modèles développés sont basés sur hypothèse que les murs ont un comportement équivalent à un mur semi-infini soumis à un saut de température lors de la coupure du chauffage. La description et les résultats de ces modèles sont décrits dans l'annexe I.

L'analyse de ces modèles a montré que les modèles étudiés ne sont pas très performants car sensibles aux différents paramètres d'entrée, spécialement à l'inertie des murs et aux coefficients d'échange par convection. Des résultats raisonnables ont été obtenus pour des applications aux

parois avec une inertie importante (0,5 °C d'écart à la fin d'une heure entre les modèles et le cas de référence).

L'application de ce modèle pour prédire des conditions d'inconfort, s'est avéré très difficile car pour que le modèle soit raisonnablement précis, il faut connaître la température des murs au début de la coupure comme une des entrées du modèle. Comme dans un bâtiment résidentiel la température des murs n'est pas connue, nous avons écarté ce modèle pour prédire l'inconfort lorsque des coupures du chauffage électrique.

La précision des différents modèles ne permet pas non plus un couplage avec le logiciel TRNSYS car des écarts de 0,5 °C sont obtenus à la fin d'une heure entre ces modèles et les simulations TRNSYS. Ainsi, on a conclu que les modèles étudiés ne permettent pas de résoudre le problème de calcul infra-horaire de TRNSYS mentionné précédemment et on a écarté ces modèles de notre étude.

Le logiciel *EnergyPlus* permet que le calcul soit fait à partir des différences finies, ce qui permet de dépasser ces problèmes. Néanmoins il faut résoudre des systèmes d'équations très grands, et très coûteux en termes de temps. On a donc on a procédé à la construction d'un modèle de simulation adapté à nos besoins qui sera détaillé ensuite.

3.2.2. Optimisation des modèles thermiques

Une autre technique que l'on retrouve souvent dans la littérature consiste en l'utilisation d'algorithme d'optimisation pour déterminer une modèle de faible taille ayant le même comportement. Le processus consiste dans une optimisation séquentielle paramétrique pour minimiser l'erreur entre le modèle réduit et le modèle de référence. Ces modèles sont calculés généralement numériquement itérativement. Des exemples d'application peuvent être trouvés en [Gouda et al., 2002] [Wang & Xu, 2006] [Fraisie et al., 2002].

Cependant ces méthodes peuvent demeurer longues en termes de temps d'optimisation, ainsi nous n'avons pas retenu cette méthode.

3.2.3. Techniques de transformation basées sur des variables d'état

La troisième catégorie de réduction des modèles consiste en la transformation de l'ensemble des variables d'état original qui décrit le comportement du bâtiment. Une de ces techniques est la réduction par troncature dans la base équilibrée.

Premièrement, on transforme le modèle d'état, selon la technique de Moore [Moore, 1981], pour trouver l'énergie, liée à chaque variable d'état, qui est transmise par les entrées et observée dans les sorties du modèle. Ainsi à partir d'un modèle de référence, comme les différences finies, et en appliquant cette technique on garde seulement les états qui ont un impact plus important. Une variante de cette technique, présentée par Rabenstein [Rabenstein, 1994], permet que la troncature soit faite toute en gardant le gain statique du système.

Dans notre étude cette technique a été repérée comme la plus adéquate à nos besoins car elle permet une réduction rapide, et simple à programmer avec une bonne précision même pour des petits pas de temps.

Comme on a pu voir les logiciels de simulation dynamique plus répandus ne sont pas donc adéquats à la modélisation du contrôle des équipements. Ainsi on a développé un modèle de simulation dynamique du bâtiment spécifique, dont on peut connoter la qualité. Ce modèle va maintenant être présenté.

3.3. Description du modèle de simulation du bâtiment mis en œuvre

Pour pouvoir prendre en compte les différentes sollicitations auxquelles le bâtiment est sujet, on s'est basé sur un modèle d'analogie électrique. Le modèle de simulation décrit a été codé sous Matlab.

Une première version de ce modèle a été présentée dans une de nos études [Da_Silva et al., 2011b] et il est présenté dans l'Annexe III du présent document.

D'abord une simplification est faite, en simulant seulement une pièce du bâtiment, on réduit grandement le nombre d'équations à résoudre. Cette simplification permettra une analyse plus précise des conditions de confort. On mettra en œuvre le modèle décrit ci-dessous seulement pour la pièce de la maison la « moins confortable » en évaluant les conditions plus défavorables à l'effacement du chauffage (i.e. Les charges thermiques les plus faibles).

La Figure 3-4 montre le schéma retenu pour nos simulations.

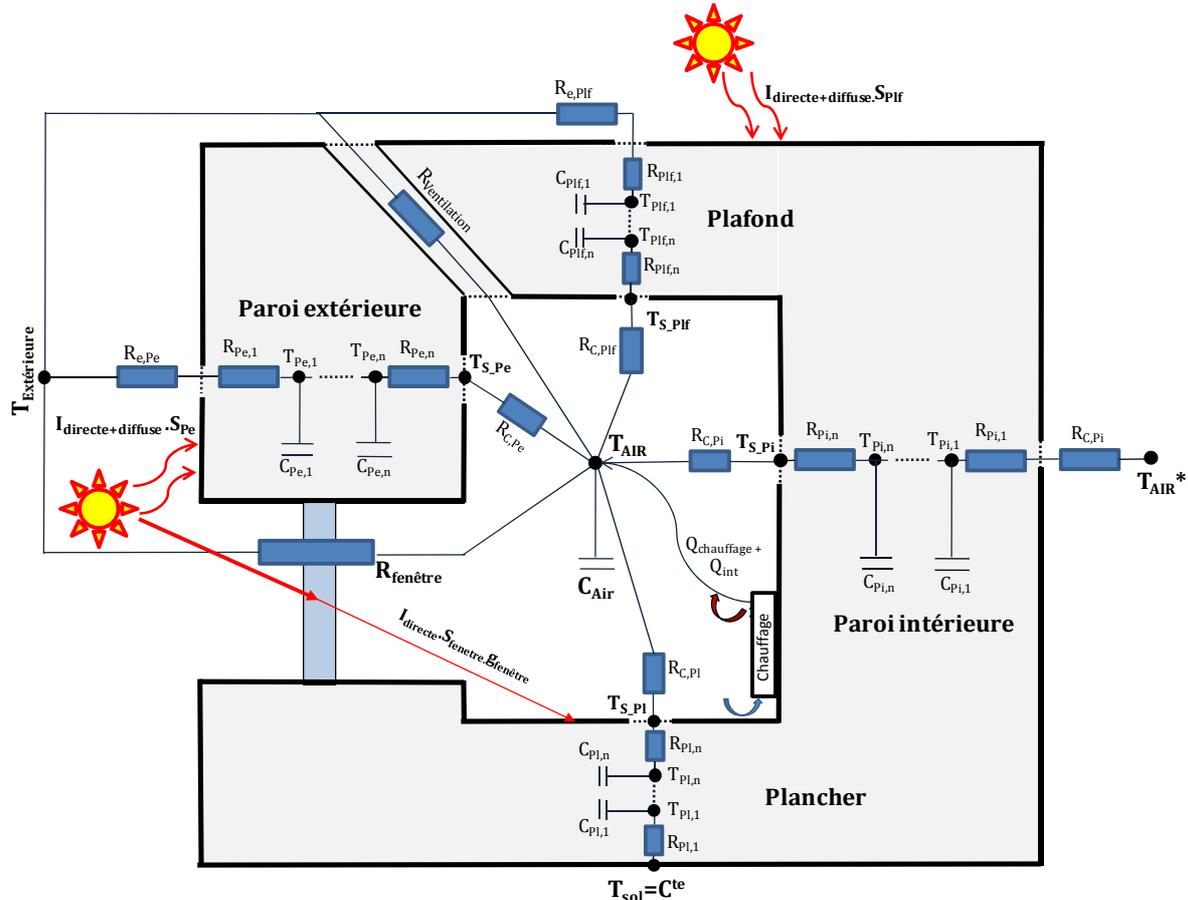


Figure 3-4 – Schéma du modèle de simulation

Les variables de la Figure 3-4 sont décrits ci-dessous :

Pe – Indice - **Paroi Extérieure**

Pl – Indice – **Plancher**

Pi – Indice – **Paroi Intérieure**

Plf – Indice – **Plafond**

$C_{i,n}$ – Chaleur spécifique de la paroi i dans le nœud n [J/kg.K]

$T_{i,n}$ – Température associé à la paroi i et nœud n [K]

$R_{i,n}$ – Résistance thermique associée à la paroi i et nœud n [K/W]

T_{AIR} – Température de l'air [K]

T_{AIR}^* – Température de l'air de pièce adjacente (égale à T_{AIR}) [K]

C_{AIR} – Capacité thermique de l'air [J/K]

$T_{S,i}$ – Température de la surface de la paroi i [K]

$R_{c,i}$ – Résistance convective intérieure de la paroi $i = \frac{1}{h_{int}S_i}$ [K/W]

h_{int} – Coefficient d'échange convectif intérieur [$W/m^2.K$]

S_i – Surface de la paroi i [m^2]

$R_{ventilation} = \frac{1}{c_{air} \cdot \dot{m}_{vent}}$ [K.s/J]

\dot{m}_{vent} – Débit de ventilation [kg/s]

c_{air} – Capacité spécifique de l'air [J/kg.K]

$R_{e,i}$ – Résistance convective extérieur de la paroi $i = \frac{1}{h_{ext}S_i}$ [K/W]

h_{ext} – Coefficient d'échange convectif extérieur [$W/m^2.K$]

$Q_{chauffage}$ – Chaleur émise par le chauffage électrique [W]

Q_{int} – Gains internes [W]

$I_{directe+diffuse}$ – Flux solaire total [W/m^2]

$I_{directe}$ – Flux solaire directe [W/m^2]

$g_{fenêtre}$ – Facteur solaire de la fenêtre

T_{sol} – Température du sol [K]

$R_{fenêtre}$ – Résistance thermique globale de la fenêtre (prenant en compte les échanges convectifs dans les frontières) [K/W]

- **Conduction de chaleur à travers des murs**

En prenant en compte les différentes propriétés de chaque paroi, une discrétisation en éléments finis est faite. Puis pour chaque paroi une réduction selon la méthode de Moore est faite. La description de la méthode de réduction est présentée en 3.3.1.

- **Conditions limite des murs**

Pour les parois internes, on considère qu'il existe une pièce adjacente où la température d'air est la même que dans la pièce simulée (paroi adiabatique).

La paroi extérieure et le plafond échangent de la chaleur avec l'air extérieur à travers un coefficient d'échange global (h_{ext}).

Pour la condition limite extérieure du plancher on considère qu'il est en contact avec le sol et que celui-ci est toujours à une température constante (T_{sol}).

- **Rayonnement solaire**

A partir de l'orientation et de la localisation du bâtiment et de l'heure de la journée on peut calculer l'angle d'incidence du soleil. En utilisant RABL [Ari Rabl, 1994] le calcul se fait de la manière suivante :

Le premier calcul consiste à calculer la différence entre le midi solaire et le midi correspondant à l'heure civile. Ce calcul est donné par l'équation de temps E_t :

$$E_t = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \text{ (Min)} \quad (3-5)$$

Avec :

$$B = 360^\circ \times \frac{n-81}{364}, \text{ où } n \text{ représente le jour de l'année} \quad (3-6)$$

Ensuite on calcule l'heure solaire :

$$t_{sol} = t_{heure_civile} + \frac{E_t}{60 \text{ min/h}} \quad (3-7)$$

L'angle de déclinaison de la Terre (δ) se calcule comme suit :

$$\delta = \sin^{-1} \left(-\sin 23.45^\circ \cos \frac{360^\circ \times (n+10)}{365.25} \right) \quad (3-8)$$

Le zénith (θ_s) correspond à l'angle entre la normale à la Terre, pour la zone de calcul, et le soleil et il est calculé selon l'équation ci-dessous :

$$\theta_s = \cos^{-1} (\cos \lambda \cos \delta \cos \omega + \sin \lambda \sin \delta) \quad (3-9)$$

Avec l'angle horaire solaire (ω), donné par :

$$\omega = \frac{(t_{sol}-12h) \times 360^\circ}{24h} \quad (3-10)$$

L'Azimut (ϕ_s) du soleil représente est l'angle dans le plan horizontal entre la direction du soleil le plan de la paroi. Il est calculé par :

$$\phi_s = \sin^{-1} \left(\frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \theta_s} \right) \quad (3-11)$$

Enfin on peut calculer l'angle d'incidence (θ_i), qui est l'angle entre la normale à la surface et la ligne du soleil. L'expression de calcul de l'angle d'incidence est donnée par :

$$\theta_i = \cos^{-1} (\sin \theta_s \sin \theta_p \cos(\phi_s - \phi_p) + \cos \theta_s \cos \theta_p) \quad (3-12)$$

Avec,

θ_p - angle de la normale de la surface.

ϕ_p - azimut de la surface (0° - Sud, 90° - Ouest, -90° - Est et 180° - Nord)

Si $\theta_p = 90^\circ$ (paroi verticale), l'expression de l'angle d'incidence peut s'écrire :

$$\theta_i = \cos^{-1} (\sin \theta_s \cos(\phi_s - \phi_p)) \quad (3-13)$$

Une fois tous les angles calculés, on peut calculer le rayonnement global (I_{glo}), à partir du rayonnement direct (I_{dir}) et diffus (I_{dif}), qui frappe une surface :

$$I_{glo} = I_{dir} \cos \theta_i + I_{dif} \frac{1 + \cos \theta_p}{2} + I_{glo,hor} \cdot \rho_g \frac{1 - \cos \theta_p}{2} \quad (3-14)$$

Avec,

$$I_{glo,hor} = I_{dir} \cos \theta_s + I_{dif} \quad (3-15)$$

ρ_g - coefficient de réflexion du sol

Dans l'équation 3-14 le premier terme représente le rayonnement solaire direct qui frappe la surface. Le deuxième terme représente le rayonnement diffus solaire et le troisième représente le rayonnement réfléchi par le sol. Pour calculer le rayonnement absorbé par les parois il faut multiplier le rayonnement global (I_{glo}) par le coefficient d'absorption du mur (α).

Pour le flux traversant les surfaces vitrées on prend seulement le premier terme de l'équation 3-14 et le dernier (dans le calcul de ce dernier on ne prend pas en compte le rayonnement diffus I_{dif}), car les vitres laissent passer seulement le rayonnement avec petits longueurs d'onde. Cette radiation est ensuite multipliée par le facteur solaire de la fenêtre « g » qui exprime en pourcentage la quantité du flux solaire que la surface vitrée laisse passer.

Ainsi l'expression du rayonnement qui passe à travers des surfaces vitrées est donnée par :

$$I_{Surface\ vitrée} = g \left(I_{dir} \cos \theta_i + I_{dir} \cos \theta_s \cdot \rho_g \frac{1 - \cos \theta_p}{2} \right) \quad (3-16)$$

Avec,

I_{dir} - Radiation direct (W/m²)

A partir des données sur le rayonnement direct et diffus, on peut simuler des bâtiments avec différentes orientations, tout en calculant le rayonnement qui touche les parois extérieures et le rayonnement traversant les surfaces vitrées.

• Surfaces vitrées

Les surfaces vitrées sont caractérisées par le coefficient d'échange global « $U_{fenêtre}$ » qui caractérisent la conduction de chaleur à travers la vitre mais aussi les échanges convectifs aux surfaces de celle-ci.

Le calcul du rayonnement traversant la fenêtre est détaillé dans le point précédent.

• Echanges radiatifs internes de grande longueur d'onde

Pour les cas où les simulations se font avec des radiateurs électriques, la puissance émise par rayonnement est absorbée uniformément par la surface des parois.

Dans notre modèle de simulation on a utilisé la méthode de la température moyenne radiante balancée développée par Steinman [Steinman et al., 1989].

Cette méthode permet de calculer les échanges radiatifs entre les parois sans avoir besoin de calculer les facteurs de forme. On considère que tous les parois ont un coefficient d'émissivité (ϵ) de 0.9. Les équations de transfert radiatif de grande longueur d'onde prennent alors la forme suivante :

$$q_{rad,i} = 4\sigma F_{if} T_{moyenne}^3 (T_i - T_{fi}) \quad (3-17)$$

Avec :

i - Désigne la paroi analysé

j - Désigne les autres parois de la pièce

f - Surface fictive qui représente la température moyenne des autres parois dans la pièce

σ - Constante de Stephan-Boltzman 5.670373×10^{-8} [W m⁻² K⁻⁴]

F_{if} -Facteur échange par rayonnement entre la paroi i et la paroi fictive f :

$$F_{if} = \frac{1}{\left(1.11 + \frac{A_i(1-\varepsilon)}{A_{fi}\varepsilon}\right)} \quad (3-18)$$

$T_{moyenne}$ - Température moyenne de tous les surfaces [K]

T - Température [K]

A_{fi} - Surface de la paroi fictive équivalente à l'ensemble des autres parois :

$$A_{fi} = \sum_{j \neq i}^n A_j \quad (3-19)$$

Pour prendre en compte l'équilibre net d'énergie, la méthode ajoute le coefficient suivant à l'Equation 3-17 :

$$q_{bal} = \frac{(\sum_{j=1}^N 4\sigma F_{j-f} T_{moyenne}^3 (T_j - T_{fj}) \cdot A_i)}{\sum_{j=1}^N A_j} \quad (3-20)$$

Cette méthode permet de calculer avec une bonne précision les échanges radiatifs entre les parois quand les températures des surfaces internes sont proches et toutes les surfaces se voient les unes les autres. Pour des géométries complexes, il faut utiliser un coefficient de correction présenté dans l'étude de Steinman [Steinman et al., 1989].

• Caractéristiques du nœud d'air et échanges de chaleur avec l'environnement

On considère que la température d'air est uniforme dans toute la pièce, représentant ainsi la température moyenne de l'air dans la pièce.

Différents échanges sont pris en compte dans le nœud d'air :

- Echanges convectifs avec les parois et les surfaces vitrées.
- Echanges dus à la ventilation et/ou infiltrations.
- Gains dus au chauffage électrique et gains internes

A partir du volume d'air de la pièce à simuler on calcule la capacité de l'air à la quelle on ajoute la capacité due aux meubles et autres objets qui se trouvent dans la pièce. De ce fait, on considère que tous les éléments dans la pièce sont à la même température.

Dans nos simulations deux types de pièces peuvent être simulées selon le type de bâtiment soit une maison individuelle ou un appartement.

Le schéma de la figure 3-4 représente une maison individuelle où le plancher est en contact direct avec le sol et le plafond en contact avec l'air extérieur. Le plafond est aussi soumis au rayonnement provenant du soleil.

Dans le cas où la pièce à simuler se trouve dans un appartement, le plafond et le plancher sont modélisés comme des parois intérieures, i.e. les parois sont simulées comme des parois adiabatiques. Toutefois le plancher absorbe toujours le rayonnement solaire qui traverse la vitre.

Comme on a vu précédemment les logiciels existants ne sont pas adaptés à nos besoins de simulation, spécialement à cause de la conduction à travers la structure. La méthode de calcul des transferts de chaleur à travers de la structure est maintenant décrite.

3.3.1. Modèle de simulation de la conduction de chaleur à travers de la structure du bâtiment

La méthode qui répond à nos besoins est la méthode des différences finies, mais à cause des grands temps de simulation nécessaires on a cherché des méthodes pour la réduction des variables d'état, tout en gardant la réponse de la structure à des sollicitations internes et externes.

Une de ces méthodes appelée « réduction par troncature dans la base équilibrée ou technique de Moore » a été retenue pour notre modèle. Cette méthode est décrite ici en suivant Rabenstein [Rabenstein, 1994].

Elle consiste à réduire un modèle d'état de manière à garder le comportement du système de référence. Dans notre étude, le modèle de référence consiste dans une discrétisation de la paroi en 100 nœuds. Dans la suite on présente un exemple de construction du modèle d'état.

La construction des matrices A, B, C, D (Equations 3-3 et 3-4) se fait à partir des équations différentielles du premier ordre, en considérant que les parois ont des couches homogènes. Un exemple de construction de ces matrices pour une paroi discrétisée en deux nœuds est présenté ci-dessous.

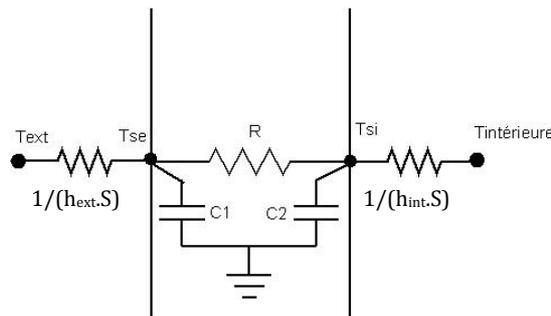


Figure 3-5 - Schéma électrique d'une paroi discrétisée en deux nœuds

Les différentes caractéristiques de la paroi exposées dans la Figure 3-5 sont : h_{int} et h_{ext} sont les coefficients de convection intérieurs et extérieurs, S la surface de la paroi et R la résistance équivalente de la paroi et C_1 et C_2 représentent chacun la moitié de la capacité thermique de la paroi.

Les équations différentielles de premier ordre s'écrivent de la manière suivante (bilan énergétique) :

$$C_1 \frac{dT_{se}}{dt} = h_{ext} S (T_{ext} - T_{se}) + \frac{T_{si} - T_{se}}{R} \quad (3-21)$$

$$C_2 \frac{dT_{si}}{dt} = h_{int} S (T_{int} - T_{si}) + \frac{T_{se} - T_{si}}{R} \quad (3-22)$$

Avec ;

$$R = \frac{\text{épaisseur}}{\lambda S}, \lambda \text{-conductivité de la paroi} \quad (3-23)$$

Et donc le modèle à états s'écrit de la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_{se}}{dt} \\ \frac{dT_{si}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(h_{ext}S + \frac{1}{R})}{C_1} & \frac{1}{RC_1} \\ \frac{1}{RC_2} & \frac{-(h_{int}S + \frac{1}{R})}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{se} \\ T_{si} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{h_{ext}S}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{h_{int}S}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{se} \\ T_{si} \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

$$[q''] = [0 \quad h_{int}] \begin{bmatrix} T_{se} \\ T_{si} \end{bmatrix} + [0 \quad -h_{int}] \begin{bmatrix} T_{ext} \\ T_{int} \end{bmatrix} \quad (3-25)$$

L'extension de ce modèle d'état à un grand nombre de nœuds s'opère grâce à un algorithme qui discrétise la paroi.

L'application de la technique de Moore part du modèle d'état obtenu par différences finies : on identifie les états qui ne sont pas facilement contrôlables par les entrées et ceux qui ne sont pas facilement observables dans les sorties du système et on les élimine.

Les composantes d'états commandables et observables sont définies par les matrices « K » et « W », qui représentent respectivement les grammians de commandabilité et de observabilité.

Ces deux matrices sont obtenues par résolution de type Lyapounov :

$$\begin{cases} A.K + K.A^T + B.B^T = 0 \\ A^T.W + W.A + C^T.C = 0 \end{cases} \quad (3-26)$$

Les représentations des variables d'état ne sont pas uniques, donc on transforme le modèle d'état initial (équations 3-3 et 3-4), par :

$$x(t) = T \hat{x}(t) \quad (3-27)$$

Le calcul de la matrice « T » c'est fait par :

$$T = LUM^{-\frac{1}{2}} \quad (3-28)$$

Où, L est la matrice triangulaire basse de K à travers une décomposition de Cholesky, K=LL^T, M² et U sont les matrices qui contiennent les valeurs et vecteurs propres de la matrice L^TWL. Ainsi la commandabilité et l'observabilité du système ont un rôle d'égale importance dans la construction de cette base. Donc le modèle d'état est transformé de la manière suivante :

$$(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}, \hat{K}, \hat{W}) = (T^{-1}AT, T^{-1}B, CT, D, T^{-1}KT^{-T}, T^TWT) \quad (3-29)$$

Le nouveau modèle à états a le même comportement entrée/sortie que le modèle initial (différences finies) mais la représentation interne des états est différente. Il est caractérisé par le fait que les grammians transformées \hat{K} et \hat{W} sont égaux à la matrice diagonale composée des valeurs singulières de Hankel du modèle. Les valeurs singulières de Hankel représentent l'énergie liée à chaque état, qui est transmise par les entrées et observé par les sorties du système [Déqué et al., 1997].

L'objectif de cette technique de réduction est donc de garder seulement les états du système qui sont plus facilement commandables et observables. Finalement, en appliquant la transformée de l'équation 3-29, notre système devient :

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{A}_{11} & \hat{A}_{12} \\ \hat{A}_{21} & \hat{A}_{22} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{B}_1 \\ \hat{B}_2 \end{bmatrix} u(t) \quad (3-30)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} \hat{C}_1 & \hat{C}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \end{bmatrix} + \hat{D} u(t) \quad (3-31)$$

Dans cette nouvelle base, on peut considérer que les états $\hat{x}_1(t)$ représentent les états qui sont les plus importants, tandis que $\hat{x}_2(t)$ représentent les états redondants.

Pour réduire notre système on élimine les états $\hat{x}_2(t)$ mais pour assurer le même gain statique on applique les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \hat{A}_{11} - \hat{A}_{12} \hat{A}_{22}^{-1} \hat{A}_{21} \\ \bar{B} &= \hat{B}_1 - \hat{A}_{12} \hat{A}_{22}^{-1} \hat{B}_2 \\ \bar{C} &= \hat{C}_1 - \hat{C}_2 \hat{A}_{22}^{-1} \hat{A}_{21} \\ \bar{D} &= \hat{D} - \hat{C}_2 \hat{A}_{22}^{-1} \hat{B}_2 \end{aligned} \quad (3-32)$$

Les matrices $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}$, constituent le modèle réduit. Cette méthode est facile à programmer, d'autant que cette technique est disponible dans l'environnement Matlab depuis 1992 [Déqué et al., 1997].

Le modèle retenu pour nos simulations réside dans le calcul du modèle d'état de chaque paroi, par différences finies selon [Dehousse et al., 1988]. Ensuite, on applique la réduction de Moore présentée auparavant.

L'ordre du modèle réduit doit rester faible pour permettre un temps de simulation rapide, tout en gardant sa précision. Sachant que les systèmes de chauffage simulés ont des hautes fréquences autour de 0.01 Hz, notre modèle doit donner une réponse proche de celle du modèle avec des différences finies. On a réalisé une analyse fréquentielle sur la puissance de chauffage et sur la température de l'air pour déterminer la précision de notre modèle.

3.3.1.1. Analyse de la réponse en fréquence et de la réponse à des échelons de température du modèle réduit

Une des questions qu'on se pose est : quel ordre doit avoir le système réduit pour garantir un écart faible par rapport au modèle de référence (différences finies - DF). Dans ce but, on a réalisé une étude pour différentes parois de la réponse en fréquence des différents modèles réduits et à des sauts de température. Puis on a évalué les écarts de température entre les modèles réduits et le modèle de référence.

On a fixé que le modèle réduit devait avoir une réponse caractéristique d'un écart maximum de 0.01°C pour toute la gamme de fréquences. On a considéré que, s'il existe un déphasage entre le modèle réduit et le modèle DF avec un écart d'amplitude petit (<0.01°C) le modèle reste valide.

Relativement au saut en température on a défini que l'écart maximum doit être de 0.01°C entre le modèle testé et le modèle de référence (DF).

Les caractéristiques des parois testées sont présentées dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1 – Caractéristiques des parois testées

	Caractéristiques	Paroi - 1 (Isolation par extérieure)	Paroi - 2 (Isolation par l'intérieure)	Paroi - 3 (Briques)
Couche externe	Densité (kg/m ³)	35	2300	720
	Capacité (J/kg.K)	840	920	790
	Conductibilité (kJ/h.m.K)	0.11	6.32	1.23
	Epaisseur (m)	0.08	0.2	0.3
Couche interne	Densité (kg/m ³)	2300	35	-
	Capacité (J/kg.K)	920	840	-
	Conductibilité (kJ/h.m.K)	6.32	0.11	-
	Epaisseur (m)	0.2	0.08	-

Note : pour les parois 1 et 2

Isolation = caractéristiques de polyuréthane

Couche structurel = béton classique

En ayant comme sortie la température de la surface intérieure, on a analysé la réponse en fréquence des systèmes d'ordre 2, 4 et 6 ordres, pour des excitations de température extérieure et intérieure. Ensuite on présente les diagrammes de Bode et la réponse à un échelon pour la paroi 1.

Dans les diagrammes de Bode, l'amplitude de la réponse est représentée en valeur absolue et l'échelle utilisée n'est pas logarithmique. Dans les figures suivantes les variables T_{EXT}, T_{INT} et T_{SI} représentent respectivement température extérieure, température interne et température de la surface interne.

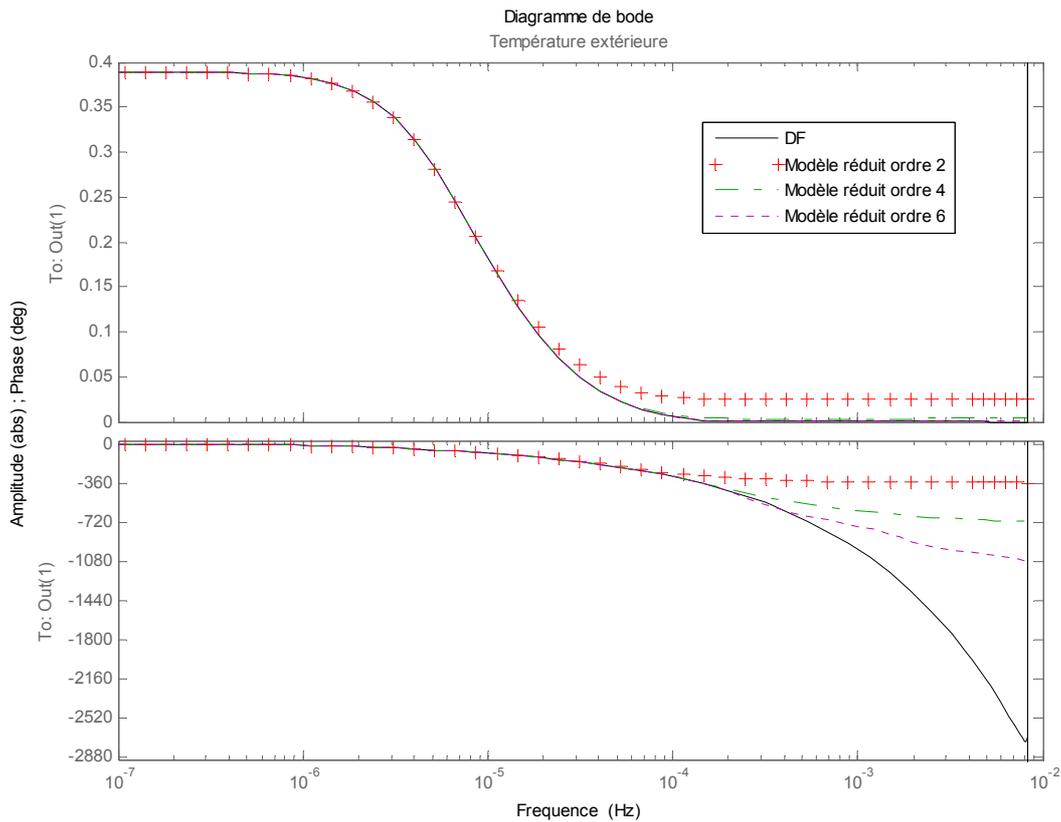


Figure 3-6 - Influence de la T_{ext} en T_{SI} - Paroi-1

Pour une excitation de la température extérieure (Figure 3-6), on peut voir que le modèle d'ordre 2 devient incorrect pour des fréquences plus élevées que 10^{-5} Hz car la réponse est déphasée et l'écart en termes d'amplitude est égal à 0.04 °C. Les modèles d'ordre 4 et 6, sont déphasés pour des fréquences d'excitation supérieures à 2.10^{-4} Hz (1.39 heures) et 3.10^{-4} (0.92 heures) respectivement. Cependant l'amplitude de l'écart a une valeur absolue reste très faible (<0.01 °C) pour ces fréquences.

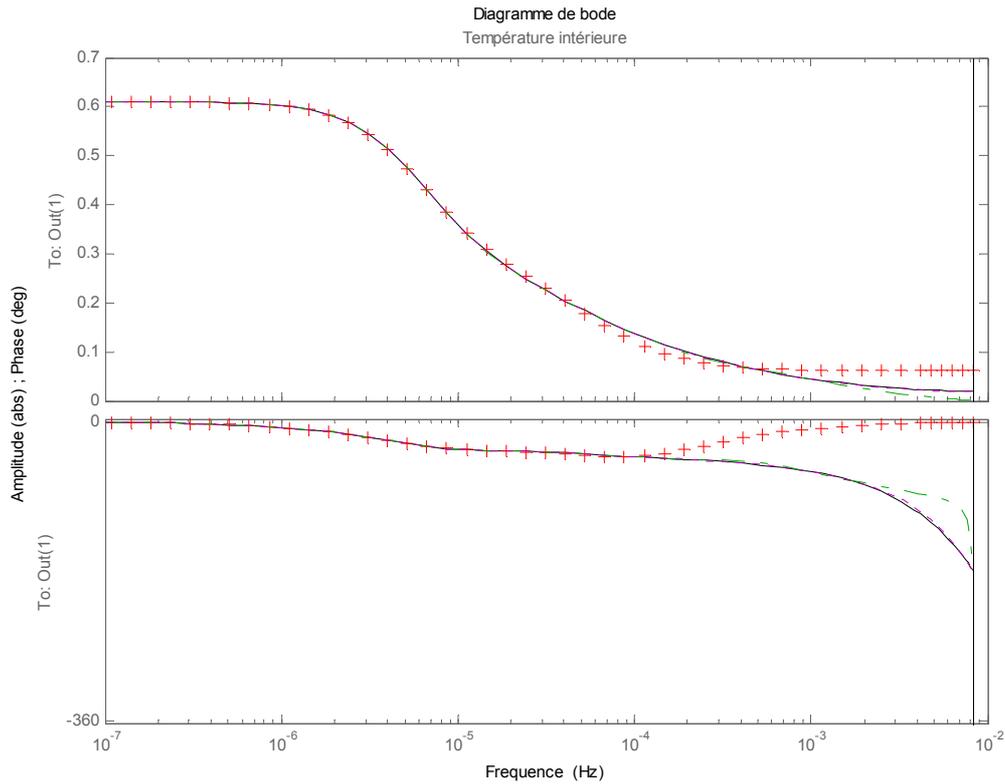


Figure 3-7 - Influence de T_{int} en T_{SI} – Paroi-1

Relativement à la réponse à une excitation par la température intérieure, on peut voir que le modèle d'ordre 2 n'est valable que pour des fréquences inférieures à 3.10^{-5} Hz car la réponse en valeur absolue présente un écart plus grand que 0.01 °C par rapport au modèle de référence à partir de cette fréquence.

Pour des fréquences élevées, le modèle d'ordre 4 est déphasé et la valeur en termes d'amplitude du modèle de référence reste supérieure à 0.01 °C (égale à 0.03 °C).

Le seul modèle valable dans ce cas est le modèle d'ordre 6, qui suit parfaitement le modèle de référence pour toute la gamme de fréquences.

Ensuite, on présente la réponse du système pour les différents modèles, à un saut de température (en échelon) en température extérieure et intérieure.

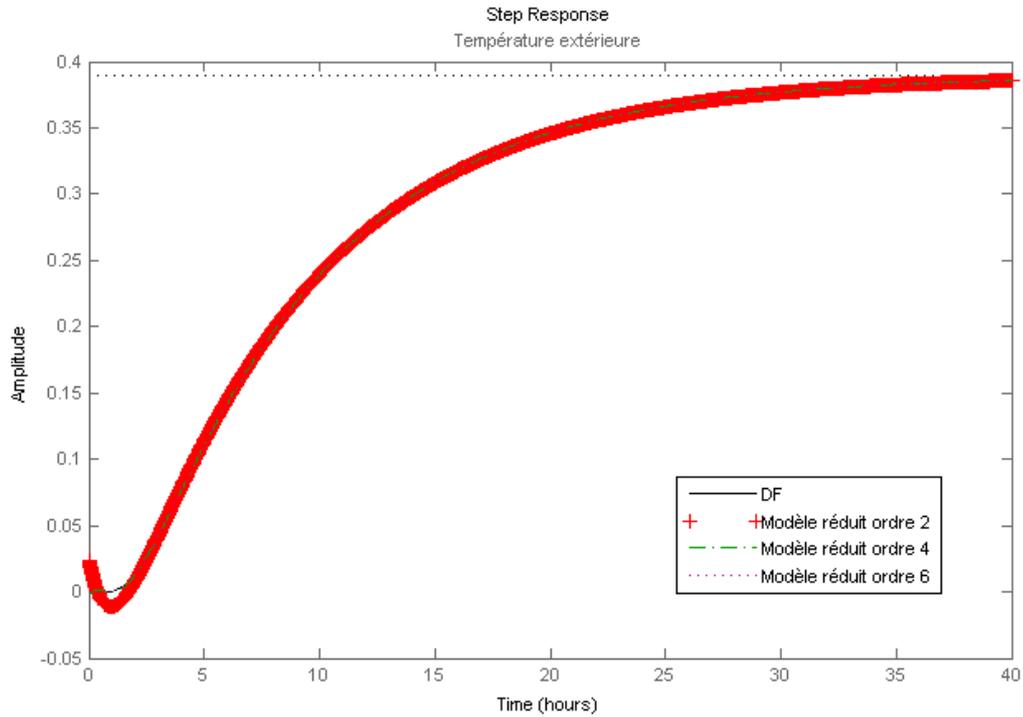


Figure 3-8 – Réponse de la Paroi-1 à un échelon de température extérieure

La réponse du système à un saut de température extérieure en échelon est présentée sur la Figure 3-8. Seul le modèle d'ordre 2 présente une différence supérieure à 0.01 °C, dans l'évolution de la température de la surface interne au début du saut en température (jusqu'à 2,5 heures). Cet écart peut être vu avec plus de précision sur la figure suivante.

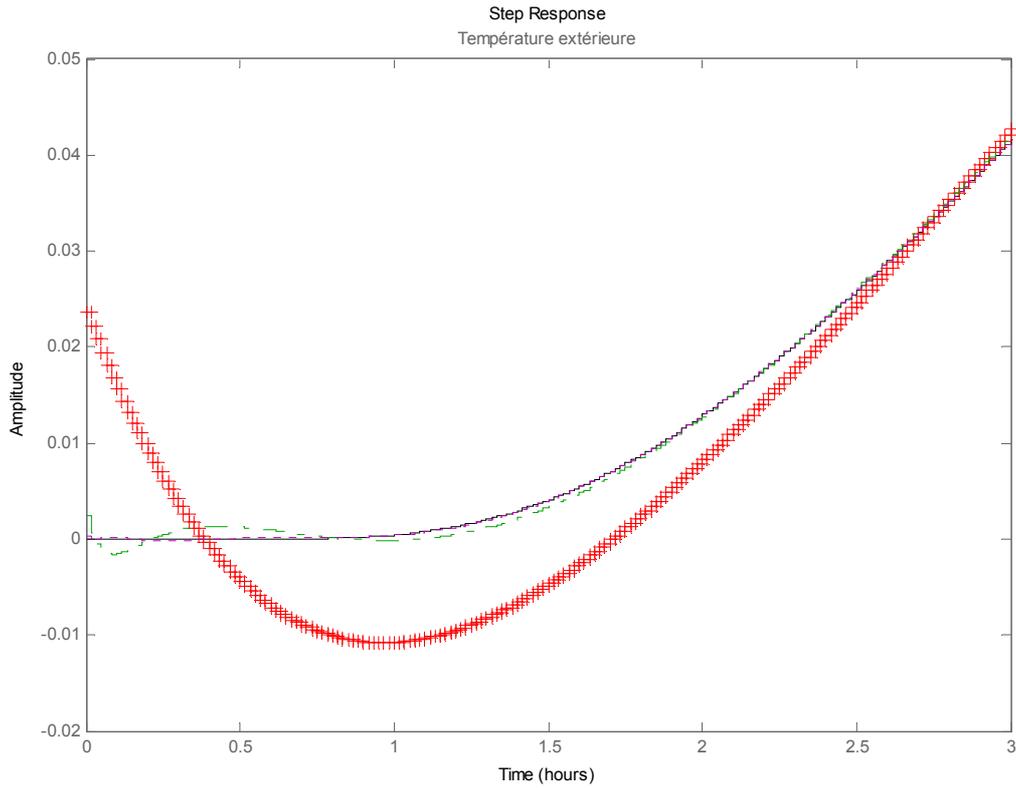


Figure 3-9 – Zoom sur les premières trois heures de la Réponse de la Paroi-1 à un échelon température extérieure

La Figure 3-10 donne la réponse de la Paroi-1 à un échelon de température intérieure.

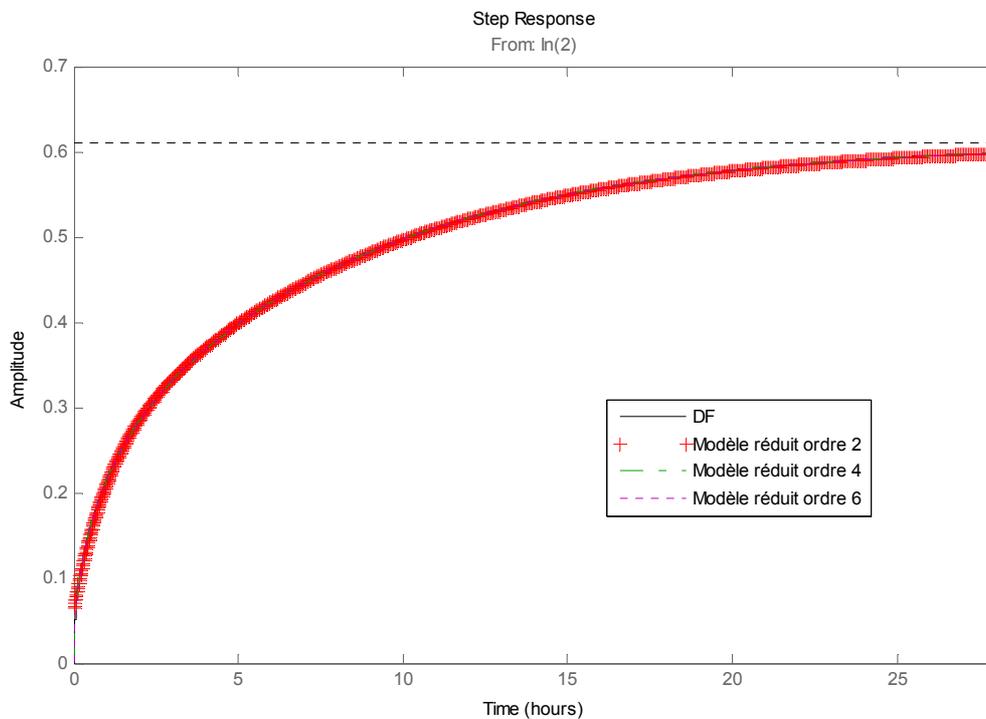


Figure 3-10 – Réponse de la Paroi-1 à un échelon de température intérieure

Comme on peut voir à partir de la Figure 3-10, tous les modèles suivent parfaitement l'évolution du modèle de référence (écart < 0.01 °C).

Le modèle retenu a été le modèle d'ordre 6 car il permet une meilleure précision que les deux autres modèles et il permet une réponse très proche du système de référence pour des excitations de la part de la température intérieure. Cette réponse devient très importante car les contrôles sur le système chauffage auront un effet non négligeable sur la température intérieure. Comme les fréquences de contrôle des systèmes de chauffage peuvent aller jusqu'à 0.01 Hz, il faut que le modèle retenu soit précis pour ces fréquences, car le confort thermique va dépendre aussi de la température des surfaces internes des parois.

Grâce à cette réduction, on peut retrouver un système d'ordre 6 au lieu d'un modèle d'ordre 100 (DF), réduisant grandement le temps de calcul (Tableau 3-2).

Tableau 3-2 – Temps de calcul pour un modèle avec différentes ordres pour un ordinateur commun.

Ordre du modèle	Temps de simulation (secondes)
Ordre 2	5.35
Ordre 4	5.41
Ordre 6	5.62
Différences finies	16.74

Dans le Tableau 3-2 on peut voir le temps de calcul, du modèle de simulation présenté, pour une simulation d'un mois avec un pas de temps d'une minute. Le temps de simulation avec des modèles réduits, d'ordre 2, 4 et 6, donnent des temps de simulation équivalents. Le temps de simulation avec le modèle aux différences finies va presque tripler le temps de simulation.

Dans une application à grande échelle (réseau de distribution), la méthode de réduction permet de réaliser des simulations environ trois fois plus rapides.

Les figures pour les autres parois peuvent être trouvées dans l'Annexe IV. Les figures pour les autres parois, même en ayant des différences de réponse donnent les mêmes conclusions en termes de précision.

3.3.2. Caractéristiques et contrôle du chauffage électrique

Le type de chauffage électrique étudié correspond aux systèmes présentés dans le chapitre 1 (en 1.1.1.1.1 et 1.1.1.1.2), c'est-à-dire les convecteurs et radiateurs à effet Joule.

La chaleur libérée par les systèmes de chauffage de type convecteur électrique, et par les gains internes (équipements électriques, chaleur émise par les occupants...) est considérée à 100 % convective et totalement absorbée par le nœud d'air. Cette hypothèse n'est pas loin de la réalité car Bézian [Bézian et al., 1997] montre dans ses expérimentations, que la partie de la chaleur libérée par les convecteurs électriques par convection correspond à 90 à 95 % de la chaleur totale émise.

Pour les simulations réalisées avec des radiateurs électriques (appelés « chauffages radiants » dans le langage courant), 60 % de la puissance émise est transmise à l'air et les 40% restants de la puissance sont absorbés par les parois [Bézian et al., 1997].

Pour prendre en compte l'inertie des systèmes de chauffage, on peut ajouter une équation de plus (équation différentielle du premier ordre) à notre modèle pour décrire le fonctionnement de ces systèmes de chauffage. Cependant, les appareils analysés ont une masse faible et donc on considère qu'ils ont une inertie négligeable.

La régulation des équipements de chauffage dépend fortement de la manière avec laquelle le thermostat mesure la température de l'air. Il existe deux types de thermostats utilisés : électromécaniques et électroniques.

3.3.2.1. Thermostats électromécaniques

Les thermostats électromécaniques ont un fonctionnement tout ou rien. Dans ces dispositifs, il existe entre le déclenchement et l'arrêt du chauffage un écart (différentiel statique), en moyenne, de 2K (1K entre la consigne et le déclenchement et 1K entre la consigne et l'arrêt). Ces thermostats peuvent être divisés en deux types principaux : Bilame et accélérés.

Le contrôle des thermostats à bilame est réalisé par un aimant et une pastille de fer, qui provoquent l'arrêt ou l'allumage de la résistance électrique du chauffage. Le différentiel statique de ce type de thermostat peut atteindre quelques degrés Celsius. Les cycles de marche-arrêt de ce type de thermostat sont normalement compris entre 20 et 60 minutes. A cause de ces temps de cyclage, ce type de thermostat est utilisé dans les installations de forte inertie.

Dans les thermostats accélérés, il y a une résistance de plus, appelée résistance accélératrice, qui permet, par l'échauffement du détecteur de température que l'alimentation de la résistance électrique soit coupée avant que la température de l'air ne soit trop élevée. Ces thermostats permettent un fonctionnement On/Off de durée modulée, qui permet de minimiser les variations cycliques de température (Cycles de marche/arrêt de 5 à 10 minutes).

Ces types de thermostats sont présents dans une grande partie des équipements de chauffage à effet Joule. Cependant les nouveaux modèles ont des thermostats électroniques plus précis.

3.3.2.2. Thermostats électroniques

Pour la régulation électronique, le système déclenche et s'arrête avec un écart (différentiel proportionnel), en moyenne, de 0.2 K (0.1K entre la consigne et le déclenchement et 0.1K entre la consigne et l'arrêt –Figure 3-11).

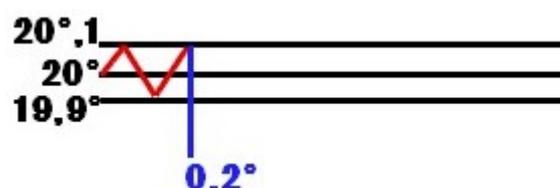


Figure 3-11– Différentiel statique de mesure d'un thermostat électronique

Ce type de système contrôle la température avec des pas de temps compris entre 30 et 60 secondes et il a généralement plus d'options de contrôle embarqué, comme la programmation horaire et le contrôle « intelligent » de différents radiateurs.

Une de ces particularités est la régulation avec bande proportionnelle, c'est-à-dire, que le mode de fonctionnement n'est pas ON/OFF, mais une fois que la température est proche de la consigne, le contrôleur module la puissance de l'appareil de manière à maintenir la température la plus constante possible. Ce type de contrôle est appelé contrôle par bande proportionnelle. La bande proportionnelle correspond à la variation de la température nécessaire pour faire varier la puissance de zéro à sa valeur nominale.

La valeur de la bande proportionnelle va définir la sensibilité du régulateur (Figure 3-12), mais il faut dire qu'une bande trop large va faire que le contrôle de la température sera très lent et une bande trop petite va faire que la température conserve une forme sinusoïdale.

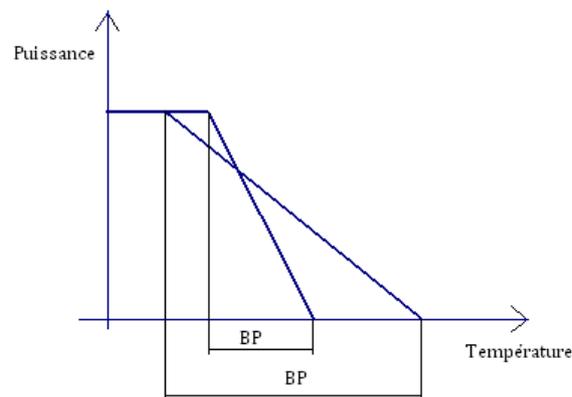


Figure 3-12- Différentes bandes proportionnelles

Il existe encore d'autres types de contrôle liés au type proportionnel comme les régulateurs proportionnel-intégral (PI) et les régulateurs proportionnel-intégral-dérivé (PID) pour améliorer ce type de régulation :

- *Action proportionnelle* : module la puissance en fonction de l'écart de température.
- *Action intégrale* : module la puissance avec une vitesse proportionnelle à l'écart.
- *Action dérivée* : module la puissance en fonction de la vitesse de variation de l'écart.

Ces trois actions ont pour objectif de rendre la régulation robuste, rapide et précise.

Un autre point qui attire l'attention, c'est la position du thermostat pour avoir une mesure correcte de la température dans une pièce. Pour avoir une mesure « correcte » de température, le thermostat doit être situé à 1.5 m de hauteur dans un lieu où il y a une bonne circulation d'air, en évitant les courants d'air, le rayonnement solaire ou des appareils, les lieux étroits et les cheminées.

Presque tous les appareils ont le régulateur de température monté dans le corps de l'appareil. Pour ces équipements, la précision de mesure de la température dans la pièce est moins bonne. Un système de chauffage régulé avec un thermostat bien placé va améliorer le confort (température plus précise).

Les deux types de thermostats présentés peuvent être couplés avec des programmeurs de chauffage. Ces programmeurs permettent que le fonctionnement se fasse en différents modes au cours de la journée, selon la programmation faite par l'utilisateur. Le contrôle des différents émetteurs est fait généralement par fil pilote¹³. Les modes associés à ces contrôles sont généralement divisés selon quatre ou six ordres de commande (six ordres pour les émetteurs de chaleur éligibles au Label Promotelec). On présente les quatre principaux ordres de commande :

Confort – température de consigne choisie par l'utilisateur quand les pièces du bâtiment sont occupées.

Eco – régulation du thermostat pour une température de 2/3 °C plus basse que dans le mode *Confort*, pour des absences courtes.

Hors-gel – température de consigne d'environ 7/8 °C pour des absences longues.

Arrêt – Coupure de l'alimentation de la résistance électrique.

Pour notre étude, on n'a retenu que des thermostats On/Off ayant un différentiel statique de 1K pour les bâtiments d'avant l'année 2000 et, pour les bâtiments après 2000, on applique un différentiel statique de 0.2 K.

3.4. Confort thermique des occupants

L'application de stratégies de contrôle au chauffage électrique aura un impact sur les conditions thermiques du bâtiment et la température à l'intérieur du bâtiment va être modifiée. La norme 7730 [en7, 2006] présente une approche analytique dans laquelle on utilise des indices pour quantifier la sensation de confort des occupants, respectivement PMV¹⁴ et PPD¹⁵.

Ces indices sont basés sur le bilan thermique du corps humain en situation homogène et stationnaire. Cependant, le calcul de ces coefficients dépend de beaucoup de variables comme la tenue vestimentaire, l'activité des occupants (leur métabolisme) et les échanges hydriques (évaporation lors de la respiration et échanges de chaleur par évaporation). Notre modèle de simulation ne prend pas en compte l'humidité dans son calcul et les autres variables du modèle PMV/PPD : tenue vestimentaire, activité, vitesse d'air, restent très incertains en fonction de chaque cas d'étude.

Pour pouvoir quantifier l'inconfort thermique généré par l'application des stratégies de contrôle, on a pris comme référence les températures intérieures recommandées pour la conception des bâtiments présentés dans la norme 15251 [en1, 2007]. Ces plages de température du Tableau 3-3 ont été établies en faisant des hypothèses par rapport aux différentes entrées du modèle PMV-PPD. Les températures du Tableau 3-3 sont décrites dans la norme EN 15251 pour des calculs énergétiques au

¹³ - Fil pilote – Technologie pour programmer de manière centralisée les systèmes de chauffage électrique. La communication entre le programmeur et chaque émetteur de chaleur est faite à l'aide des signaux électriques de faible intensité, sur un fil dédié à cet usage.

¹⁴ - PMV "Predicted Mean Vote" – « Cet indice donne la valeur moyenne des votes d'un groupe important de personnes exprimant leur sensation thermique sur une échelle à 7 niveaux. Il est basé sur le bilan thermique du corps humain » [en7, 2006].

¹⁵ - PPD "Predicted Percentage Dissatisfied" – « Cet indice est une estimation de la valeur moyenne des votes de sensation thermique donnés par un groupe important de personnes exposées à la même ambiance. Mais les votes individuels sont dispersés autour de cette valeur moyenne et il peut être utile de prévoir le nombre de personnes susceptibles de ressentir un inconfort chaud ou froid » =[en7, 2006]=[en7, 2006].

pas de temps horaire. Comme nos études se basent sur un pas de temps plus court, l'évaluation du confort sera encore plus fine.

Tableau 3-3 - Températures recommandées pour la conception de bâtiments résidentiels

Bâtiments résidentiels	Catégorie	Indice équivalent PPD (%)	Plage de température opérative ¹⁶ (°C) (Hiver)
Bâtiments d'habitation : pièces de séjour (chambres, séjour, cuisine, etc.)	I	<6	21-25
	II	<10	20-25
	III	<15	18-25

Nota : Indice PPD calculés pour clo~1 et 1.2 met

Pour les bâtiments résidentiels on peut voir que la température opérative doit rester comprise entre 18/21°C (en fonction de la catégorie choisie) et 25°C. Le domaine d'application de chaque catégorie (I, II ou III) est décrit dans le tableau suivant.

Tableau 3-4 – Domaine d'application des différentes catégories

Catégorie	Domaine d'application
I	Niveau élevé attendu recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec des exigences spécifiques comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées.
II	Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.
III	Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants.

Dans notre cas, on appliquera donc la catégorie III correspondant aux bâtiments existants. Ces indices et températures restent acceptables pour des conditions stationnaires.

La norme EN 7730 fait référence à l'évaluation du confort dans des conditions dynamiques et elle précise que si les évolutions de température opérative restent inférieures à 2 K/h, le calcul des indices PMV/PPD reste valable.

Ainsi, pendant nos simulations, si des évolutions de la température opérative ne dépassent pas les 18 °C on considère la pièce comme confortable. Cependant, on analyse toujours si la vitesse à laquelle la température intérieure change, quand on applique une stratégie de contrôle, reste inférieure à de 2 K/h. Cet indicateur de vitesse nous permet d'avoir une idée du ressenti des occupants aux changements de température.

Pourtant, il faut noter que la consigne de chauffage choisie par l'utilisateur ne correspond pas à la température opérative du bâtiment en étude, car la sonde du thermostat va essentiellement mesurer la température de l'air, donc le contrôle du chauffage se fera en fonction de cette température et non la température ressentie par les occupants.

¹⁶ - Température opérative – moyenne pondérée entre la température de l'air et la température moyenne des surfaces : $T_{opérative} = \frac{T_{air} + \overline{T}_{surface_des_murs}}{2}$

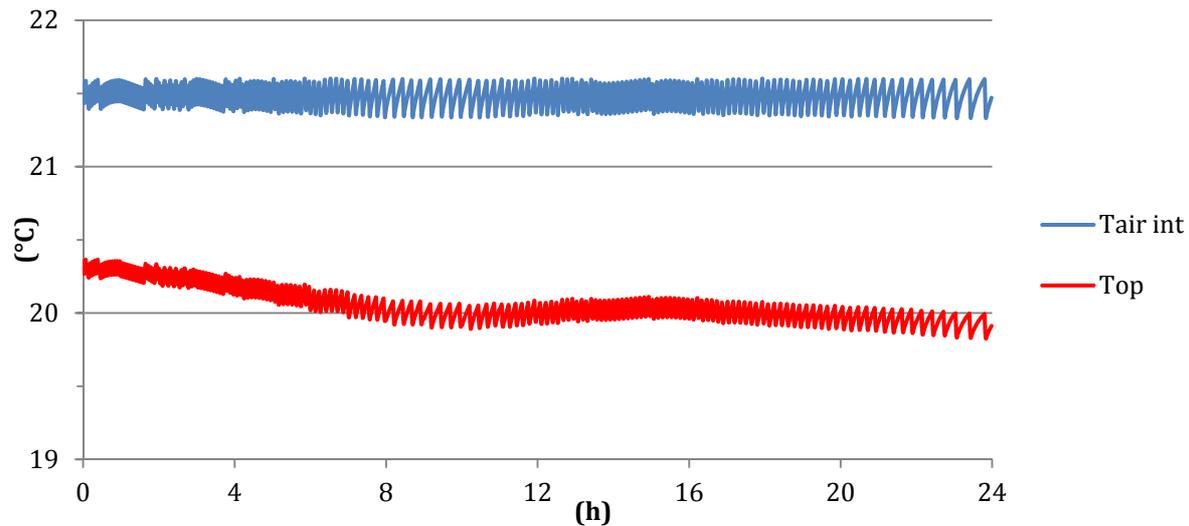


Figure 3-13 – Evolution des températures opérative et de l'air dans une pièce chauffée par un convecteur électrique

Sur la Figure 3-13, on peut voir les évolutions de la température d'air et de la température opérative dans une pièce chauffée par un convecteur électrique (figure obtenue par simulation).

La différence entre température de consigne (en bleu) de 21,5°C et température opérative de la pièce varie entre 1,1 et 1,7 °C.

En imaginant le cas d'une coupure du chauffage électrique avec cette consigne et en appliquant la catégorie III (limite inférieure de la plage de température égale à 18 °C - Tableau 3-3). L'écart de température sera de 2,4 K, entre la température opérative et la limite de confort au lieu de 3,5 K si on considérait la température d'air, donc la consigne de chauffage.

Dans une de nos études [Da Silva et al., 2010] sur l'évaluation de stratégies de contrôle appliquées à des climatiseurs individuels, on a pris l'hypothèse que les occupants peuvent changer la consigne (Température d'air) une fois par heure, pour ainsi avoir la température opérative « parfaite » (milieu de la plage de température de la EN 15251 pour l'été) tout au long de la journée. Cependant, le cas d'étude représente un bâtiment tertiaire, où premièrement, les heures d'occupation sont connues et deuxièmement on considère qu'il y a une densité d'occupants plus grande, permettant que la consigne soit modifiée plus régulièrement.

3.5. Procédure d'évaluation du contrôle du chauffage électrique

Au cours de ce chapitre, on a développé un modèle permettant une simulation des différentes stratégies de contrôle et on a aussi défini les conditions acceptables pour le confort thermique. Toutefois, pour comprendre comment les simulations et l'évaluation des résultats sont faites, on présente ci après un schéma de simulation qui a été développé dans l'un de nos travaux précédents [Da_Silva et al., 2011b].

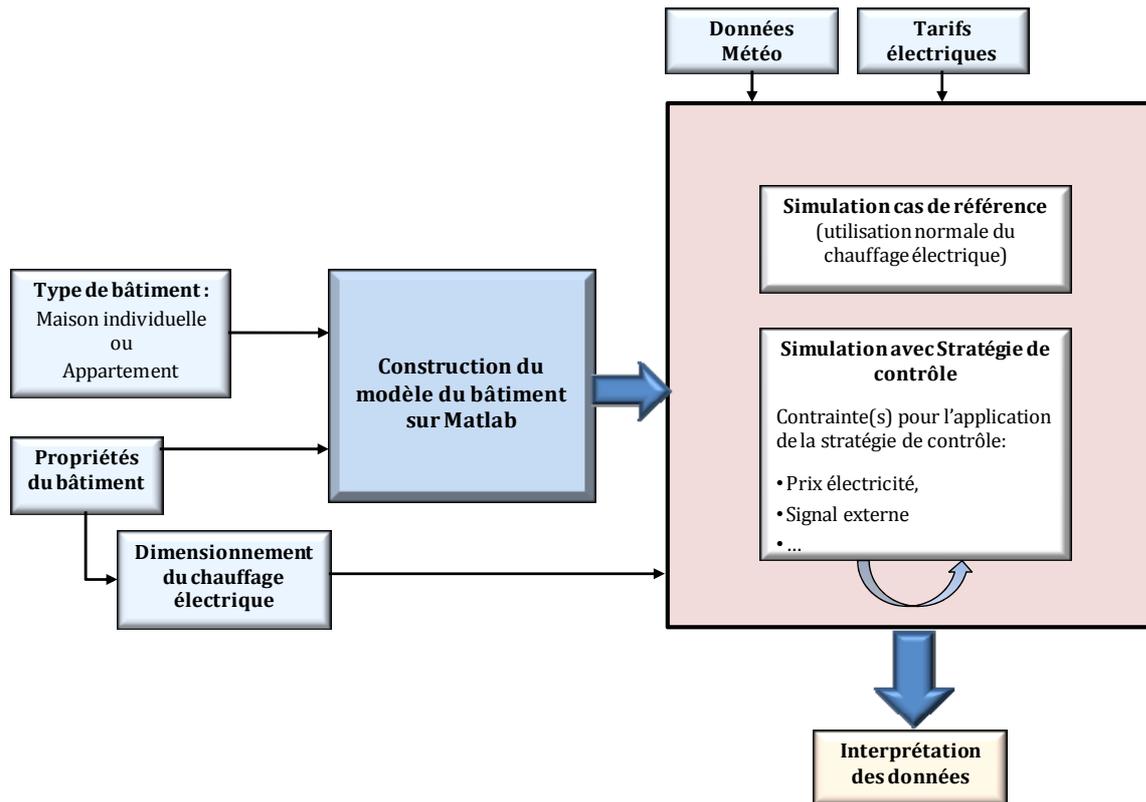


Figure 3-14 – Schéma de simulation pour l'évaluation des stratégies de contrôle

Pour pouvoir quantifier la valeur de l'application d'une stratégie de contrôle, il faut comparer les résultats de simulation avec un cas de référence.

Le premier pas c'est la définition du type de bâtiment à simuler. Comme décrit en 3.3, deux types de bâtiments peuvent être simulés, une maison individuelle ou un appartement. Les propriétés du bâtiment (matériaux de construction, dimensions...) sont introduites dans le code Matlab et on procède à la construction des matrices du modèle d'état qui va représenter le comportement du bâtiment.

A partir des données de bâtiment, on dimensionne le chauffage électrique. Ce dimensionnement se fait en prenant en compte les pertes de chaleur statiques du bâtiment selon l'équation suivante :

$$P_{chauf} = (U_f \times S_f + U_{pes} S_{pes} + \dot{m}_{vent} c_{air})(T_{conf} - T_{base}) + U_{pl} S_{pl}(T_{conf} - T_{sol}) + \phi_{relance} \quad (3-33)$$

Avec,

P_{chauf} - Puissance du chauffage électrique [W]

U_f - Coefficient d'échange global de la fenêtre [W/m²K]

S_f - Surface de la fenêtre [m²]

U_{pes} - Coefficient d'échange global des parois donnant sur l'extérieur [W/m²K]

S_{pes} - Surface totale des parois donnant sur l'extérieur [m²]

\dot{m}_{vent} – Débit de ventilation [kg/s]

c_{air} - Capacité spécifique de l'air [J/kg.K]

T_{conf} - Température au milieu de la plage de température du Tableau 3-3 [°C]

T_{base} - Température de base pour le dimensionnement du chauffage électrique (dépend de la zone climatique) [°C]

U_{pl} - Coefficient d'échange global du plancher [W/m²K]

S_{pl} - Surface du plancher [m²]

T_{sol} - Température du sol [°C]

$\phi_{Relance} = S_{pl} \cdot f_{relance}$, Surpuissance de relance pour le chauffage intermittent [W]

$f_{relance}$ - Facteur de relance selon EN 12831[en1, 2004]

Ensuite, avec la puissance de chauffage calculée, les données météo et d'autres données comme les tarifs de l'électricité, on réalise deux simulations. Le cas de référence est simulé sans qu'aucune stratégie de contrôle ne soit utilisée et en parallèle une autre simulation est faite avec l'application de la stratégie de contrôle. Les effets de la stratégie de contrôle, disparaissent au fil de quelques heures.

Cependant, le fonctionnement des thermostats pour le cas de référence et pour la simulation avec stratégie de contrôle sont déphasés. Ainsi, à la fin de la période d'analyse des effets dus à l'application d'une stratégie (7 heures), les deux simulations sont synchronisées. Cette synchronisation va permettre que quand une stratégie de contrôle est à nouveau appliquée la température soit la même pour les deux simulations.

Pour l'analyse de plusieurs bâtiments, ce schéma est répété N fois (N- nombre de bâtiments à simulés) et les données sont agrégées.

Une fois les simulations finies, pour nous aider à analyser et interpréter les résultats des simulations, on présente ci-après des indicateurs de la flexibilité des stratégies de contrôle.

3.5.1. Définition des indicateurs pour l'analyse de la flexibilité

Pour analyser les résultats de la simulation, où on applique une stratégie de contrôle, il faut un cas de référence. Il nous faut donc réaliser deux simulations, une avec application d'une stratégie de contrôle et une autre sans.

Pour mieux comprendre les analyses de la flexibilité du chauffage électrique on présente premièrement des différents indicateurs pour évaluer les aspects énergétiques et les aspects liés au confort thermique pour un bâtiment.

Le cas retenu correspond à un contrôle mené, généralement, en cas d'urgence ou à distance. Ce contrôle consiste en effacements (coupures de l'alimentation électrique). Il va nous permettre de définir quelques indicateurs nécessaires à l'analyse des résultats de simulations. Une première version de ces indicateurs a été présentée dans [Da Silva et al., 2010] et [Da_Silva et al., 2011b].

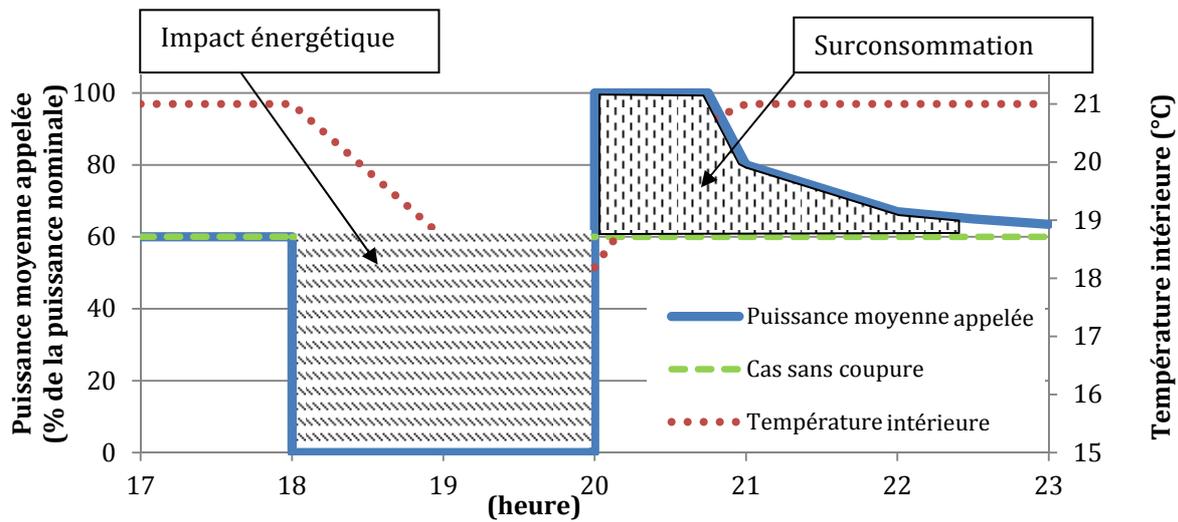


Figure 3-15 – Exemple qualitatif de l'effet sur la consommation, la puissance appelée et la température de coupure du chauffage électrique

La Figure 3-15 illustre de manière schématique une coupure de chauffage entre 18 et 20 heures. Dès que la coupure du chauffage se produit à 18 heures, jusqu'à 20 heures, la température dans le bâtiment commence à descendre. A la fin de la coupure (20 heures), la température va remonter jusqu'à sa valeur initiale (avant coupure/valeur de la consigne). Ainsi, avec l'application des stratégies de contrôle, des effets négatifs peuvent se produire sur le confort thermique des occupants.

Pendant la coupure on ne va pas consommer d'énergie, cependant lors de la mise en route du chauffage (20 h), on va consommer plus d'énergie que pour le cas de référence.

Relativement à l'évolution de la puissance appelée, avec la coupure du chauffage, on arrive à effacer le chauffage pendant 2 heures, mais lors de sa mise en route, la puissance moyenne appelée va être très différente de la puissance de référence (cas sans coupure). On appelle cette phase après l'application de la stratégie, phase de recouvrement et elle se divise en trois phases.

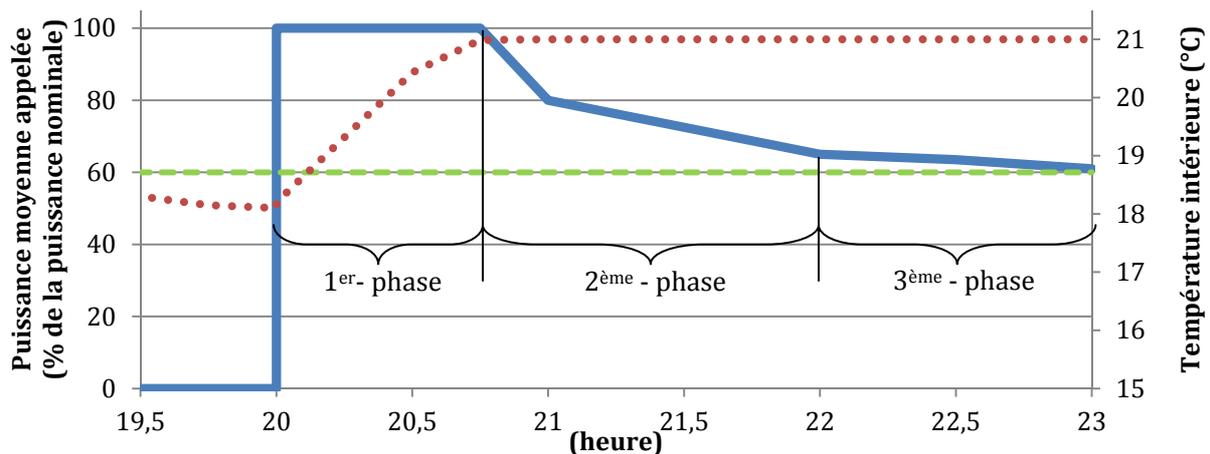


Figure 3-16 – Phase de recouvrement et les trois phases

1. La première phase correspond au chauffage en continu, donc la puissance moyenne est égale ou très proche de la puissance nominale de l'équipement. Ce fonctionnement en continu est dû au fait que comme la consigne n'est pas atteinte, l'équipement va chauffer en continu jusqu'à que la consigne de température soit respectée. Cette phase apparaît lors que les

stratégies de contrôle ne comprennent pas une évolution progressive de la consigne lors du démarrage.

2. Dans la deuxième phase, le chauffage commence à cycler (On/Off) mais du fait que le bâtiment a perdu de la chaleur, les besoins restent plus élevés que dans le cas de référence. Les besoins sont plus grands car lors de la coupure la chaleur accumulée dans la structure (parois) a été déchargée et ainsi il faut remettre les parois en température.
3. Dans la troisième phase, à cause du même effet que dans la 2^{ème} phase, la puissance reste plus élevée que dans le cas de référence, cependant la différence devient très petite (moins de 5 % d'écart). Cet effet est dû à la faible différence entre la température de l'air et les températures de paroi, restreignant ainsi le transfert de chaleur de l'air vers les parois. A cause de ce transfert de chaleur lent, la phase peut durer plusieurs heures.

A partir des effets décrits précédemment on définit les indicateurs suivants :

Indicateurs de consommation :

4. *Impact énergétique [kWh]* - Différence entre la consommation d'énergie du cas de référence et le cas où la stratégie de contrôle est appliquée, pendant la période d'application de la stratégie de contrôle correspondant à une réduction de la consommation
5. *Surconsommation [kWh]* - Différence entre la consommation d'énergie du cas de référence et le cas où la stratégie de contrôle est appliquée, pour la période avant et après la réduction de consommation due à l'application d'une stratégie de contrôle.
6. *Recouvrement [%]* = $\frac{\text{Surconsommation}}{\text{Impact énergétique}} \times 100$: cet indicateur quantifie l'énergie qui a été consommée après et avant l'application de la stratégie de contrôle (surconsommation) par rapport à la phase où la réduction de la consommation s'est produite (Impact énergétique).

Indicateurs de la puissance appelée pendant la phase de récupération :

- *Temps à pleine puissance (1^{er} phase) [min]* - cet indicateur représente le temps pour lequel le chauffage fonctionne en continu après la mise en œuvre d'une stratégie. Cet indicateur peut être appliqué aussi avant la période où il existe une réduction de consommation par rapport au cas de référence (cas du préchauffage du bâtiment).

Indicateur de l'inconfort thermique :

- *Temps par jour hors la zone de confort [min]* - cet indicateur permet de calculer le temps passé en dehors de la zone de confort par jour.
- *Degrés-heures d'inconfort (DH)* = $\int \text{Max}[(T_{\text{Limite de la zone de confort}} - T_{\text{op}}), 0] dt$ (3-34)

Ces indicateurs pourront être exprimés en fonction de la différence de température (DT) entre la température de l'air intérieure au début de l'application de la stratégie et la température extérieure moyenne pendant la coupure.

Pour réaliser une évaluation sur un groupe de bâtiments, les indicateurs présentés auparavant peuvent être appliqués directement à la courbe de charge agrégée.

3.6. Conclusion – Méthodologie d'évaluation du chauffage électrique

La manière dont les échanges de chaleur se produisent dans le bâtiment va avoir un effet sur le fonctionnement des systèmes de chauffage et vice-versa.

En prenant en compte les caractéristiques des modélisations portant sur le contrôle des équipements (ex : pas de temps, temps de simulation, précision...), on a identifié les caractéristiques que le modèle du bâtiment+chauffage devrait avoir.

Nous avons réalisé une analyse sur les principaux modèles existants pour représenter/simuler le bâtiment. On a conclu que ces modèles ne sont pas adaptés à nos besoins de simulation du bâtiment+chauffage dans le contexte de gestion de la demande.

Les problèmes rencontrés sont dus à des spécificités inhérentes à une analyse très fine du fonctionnement, notamment à cause du faible pas de temps de simulation requis pour notre analyse. Les modèles existants n'ont pas été conçus pour modéliser le fonctionnement des appareils CVC (Chauffage-Ventilation-Climatisation), ni pour une analyse fine des évolutions de température, mais plutôt pour calculer les besoins de chauffage des systèmes avec un pas de temps horaire.

Pour pouvoir répondre à nos besoins un modèle de simulation a été développé.

Une des problématiques est le transfert de chaleur par conduction de la structure du bâtiment. Une méthode répondant à nos exigences est la méthode de calcul par différences finies, très coûteuse en termes de temps de simulation. Ainsi, une méthode de réduction du modèle par différences finies (DF) a été utilisée en appliquant la technique de Moore. Ensuite, on a fait une analyse de la réponse en fréquence et la réponse à un échelon de température pour différents niveaux de réduction pour contrôler la sensibilité des résultats à cette réduction. On a conclu qu'un modèle d'ordre six permettait d'obtenir une réponse dynamique quasi-identique au modèle de référence (DF).

Une autre problématique rencontrée dans le développement de ce modèle est liée à l'utilisation d'un coefficient global d'échange (effets radiatifs et convectifs) entre les murs et l'air. Le nœud d'air devient une sorte de température opérative car il prend en compte les effets des échanges convectifs et radiatifs de grande longueur d'onde. Dans notre modèle, on utilise une méthode développée par Steinman [Steinman et al., 1989], pour modéliser les échanges radiatifs entre les murs et ainsi avoir un nœud d'air qui prend en compte seulement les échanges convectifs.

On a aussi analysé les caractéristiques des différents régulateurs des systèmes de chauffage. Le régulateur choisi pour nos simulations correspond à un thermostat On/Off avec différents différentiels statiques selon l'âge du bâtiment.

Une fois décrit le modèle de simulation, on a présenté les limites pour lesquelles le bâtiment devient inconfortable thermiquement, en se basant sur les normes EN 15251 et EN 7730.

Pour conclure, on a décrit le schéma de simulation pour représenter les différentes stratégies de contrôle. Pour une interprétation plus facile des résultats, nous avons proposé des indicateurs pour l'analyse de la flexibilité du chauffage électrique. Ces indicateurs permettent de donner une valeur aux effets énergétiques, de puissance et à l'évolution du confort thermique des occupants.

A partir de ce schéma de simulation et des différents indicateurs développés au cours de ce chapitre, on va maintenant appliquer et analyser des stratégies de contrôle identifiées au cours du chapitre II.

Chapitre IV – Evaluation de la flexibilité du chauffage électrique

Table de matières – Chapitre IV

4. Evaluation de la flexibilité du chauffage électrique	116
4.1. Application de la méthode ILCA à un convecteur électrique	117
4.1.1. Application du langage ILCA niveau utilisateur au cas du convecteur électrique.....	117
4.1.2. Application du langage ILCA niveau constructeur - convecteur électrique	118
4.2. Caractéristiques des bâtiments simulés.....	121
4.3. Etude de l'impact des différentes stratégies de contrôle	124
4.3.1. Etude de la Coupure Simple du chauffage électrique	125
4.3.2. Coupure avec condition de bande morte	138
4.3.3. Coupure avec arrêt de la ventilation mécanique	142
4.3.4. Coupure avec préchauffage.....	145
4.3.5. Passage en mode-éco	150
4.3.6. Analyse de sensibilité sur les variables de calcul du bâtiment.....	152
4.3.7. Applicabilité des stratégies de contrôle.....	162
4.4. Sélection d'une stratégie de contrôle	162
4.4.1. Analyse énergétique.....	163
4.4.2. Impact énergétique vs inconfort.....	164
4.5. Analyse des gains monétaires pour le consommateur	165
4.6. Conclusion – Evaluation de la flexibilité du chauffage électrique	171

4. Evaluation de la flexibilité du chauffage électrique

La gestion de la demande peut être appliquée dans différents buts. Dans nos études, trois types d'applications sont analysés : le contrôle du chauffage électrique en situation d'urgence, le contrôle à distance (généralement lors des pics journaliers de consommation) à travers des signaux de prix ou des contrôles à distance.

D'autres applications existent pour le contrôle des équipements électriques comme l'utilisation/optimisation de la consommation de l'électricité en fonction de la production intermittente des énergies renouvelables. Cependant ces domaines d'application restent hors de nos frontières d'étude.

Les situations d'urgence sont généralement liées à des problèmes dans le réseau de distribution ou de transport de l'électricité ou lors des vagues de froid où le réseau devient saturé. En France, des régions comme la Bretagne ont des problèmes fréquents lors des vagues de froid car la Bretagne ne produit que 8% de sa consommation. En conséquence lors d'une vague de froid, la consommation due au chauffage électrique augmente et les lignes de transport deviennent saturées.

Dans la même étude on veut quantifier la valeur apportée par des contrôles sur le chauffage électrique lors des situations d'urgence, mais aussi quantifier les effets que ces contrôles auront sur la courbe de charge et les impacts engendrés (inconfort thermique) sur les consommateurs. Ces types de contrôle sont normalement appliqués à distance (« *Direct load control* »¹⁷) car la réduction de la demande doit être rapide. De plus, les contrôles à distance pourront être aussi effectués avec l'objectif de les valoriser sur un marché de capacité ou sur le marché d'ajustement par des opérateurs d'effacement diffus.

D'autre part, avec le développement des réseaux électriques intelligents, le transport et la distribution de l'électricité seront optimisés et un tel contrôle permettra une meilleure relation entre l'offre et demande. Ainsi les producteurs d'électricité pourront créer de nouvelles tarifications pour inciter de façon plus précise les consommateurs résidentiels à consommer leur électricité en fonction des offres de production sur le marché (« *Demand Response* »).

Actuellement, il existe déjà des offres permettant de faire le lien entre production et consommation comme les *heures creuses / heures pleines* ou l'option tarifaire *Tempo* d'EDF. Néanmoins d'autres options tarifaires commencent à émerger, notamment le « *Critical peak pricing* » et le « *Real time pricing* », qui permettront d'envoyer des messages de prix plus forts aux consommateurs, en fonction des prix de marché de l'électricité, et ainsi éviter la consommation électrique lors des pointes.

Le développement des réseaux électriques intelligents comprend aussi l'automatisation du contrôle des équipements résidentiels, donc on peut imaginer un contrôle du chauffage électrique en fonction des tarifs électriques proposés. Dans notre étude, on analyse le contrôle des équipements de chauffage électrique pendant les périodes de pointe journalière (soit 18-20 heures en hiver).

¹⁷ *Direct Load control*- Contrôle à distance des équipements électriques avec l'objectif de réduire la demande pendant les périodes de fortes contraintes du réseau électrique ou quand les prix d'électricité sont élevés.

Dans les chapitres précédents, on a défini des méthodes et des modèles pour pouvoir quantifier la valeur des stratégies de contrôle. Dans ce chapitre, on détermine premièrement à l'aide de la méthode ILCA, développée dans le chapitre II, les différentes stratégies de contrôle applicables aux systèmes de chauffage électrique plus répandus (convecteurs électriques).

Les caractéristiques des bâtiments et des différentes données sont d'abord exposées pour ensuite, étudier en détail et quantifier la valeur des différentes stratégies de contrôle.

De toutes les stratégies déduites, la plus facile à mettre en place est la coupure complète du chauffage électrique. Cette stratégie même restant simple va nous permettre d'évaluer les pertes et gains d'énergie du bâtiment et d'évaluer comment la température va évoluer à l'intérieur du bâtiment. Pour cette stratégie, une analyse de sensibilité est menée sur les différentes caractéristiques des bâtiments pour quantifier les effets énergétiques engendrés et pour comprendre comment l'évolution libre en température du bâtiment est modifiée.

Ensuite, on regarde en détail les économies engendrées pour le consommateur par des tarifs existants et des tarifs innovants, pour les différentes stratégies de contrôle. Cette analyse permettra de comprendre l'influence des différentes tarifications sur les économies engendrées.

4.1. Application de la méthode ILCA à un convecteur électrique

Dans le chapitre 1, on a identifié les usages les plus importantes pour la gestion de la demande. Pour le cas de la France, on a trouvé que le chauffage électrique à effet Joule sera encore pendant quelques années un système largement répandu et qui aura un impact non-négligeable sur la consommation d'électricité et sur la courbe de charge électrique.

Avec l'objectif de quantifier la valeur de la gestion de la demande du chauffage électrique, on va d'abord s'intéresser aux différents stratégies de contrôle en appliquant la méthode ILCA à un convecteur électrique.

Cette analyse sera faite pour les systèmes de chauffage conventionnels (convecteur/radiateur électrique car ils sont les plus répandus dans les habitations en France), on en déduira des stratégies de contrôle qui seront évaluées dans les chapitres suivants.

4.1.1. Application du langage ILCA niveau utilisateur au cas du convecteur électrique

Ci après, il est présenté les états de fonctionnement et la représentation graphique du contrôle d'un convecteur électrique conventionnel pour le niveau utilisateur en se basant sur les manuels d'utilisation d'une part et sur l'expérience d'autre part. Postérieurement, les points où l'on peut agir sur l'équipement seront mis en évidence et les stratégies de contrôle seront déduites.

Tableau 4-1 – Etats de fonctionnement d'un convecteur électrique – niveau utilisateur

Etats de fonctionnement
Off - L'appareil est éteint (mais il peut toujours consommer de l'énergie)
ON - Le convecteur chauffe l'air (fonction principale)

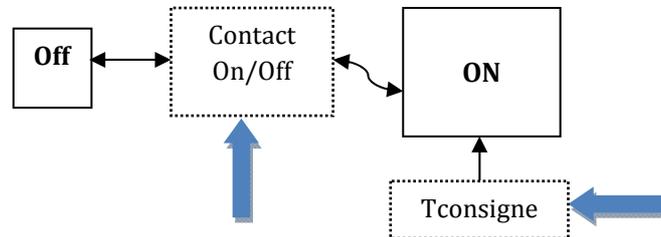


Figure 4-1 - Représentation graphique d'un convecteur électrique - niveau utilisateur

L'utilisateur allume le convecteur en appuyant sur le contact On/Off. Après cette action le convecteur est allumé et chauffe l'air en fonction de la température de consigne définie par l'utilisateur.

4.1.1.1. Stratégies déduites à partir de la représentation du niveau utilisateur

- **Action sur le contact On/Off**

L'utilisateur ou un contrôleur pourra effacer le chauffage à travers du contact On/Off. Cette stratégie pourra être employée pour éviter de consommer aux périodes où les tarifs électriques sont élevés ou pour répondre aux déséquilibres sur le réseau électrique.

- **Action sur la consigne de température**

La stratégie dans ce cas pourrait être l'augmentation ou la réduction de la consigne en fonction du tarif électrique (visant la réduction de la facture électrique).

On pourra aussi réaliser des effacements en réduisant beaucoup la consigne, évitant ainsi que la résistance s'allume.

4.1.2. Application du langage ILCA niveau constructeur - convecteur électrique

Comme il a été dit précédemment, le niveau de détail des représentations ILCA est laissé à l'utilisateur. Le principe de cet appareil est de chauffer une résistance électrique par effet Joule. Cet élément est responsable de presque tout l'appel de puissance, seulement quelques Watt sont consommés dans les modes *Off* et *Active standby*. Les convecteurs électriques émettent la chaleur générée par la résistance électrique par convection et rayonnement (5 à 10 % de la puissance émise [Béziau et al., 1997]). La chaleur émise par convection va chauffer directement l'air de la pièce où le convecteur se trouve et la chaleur émise par rayonnement va être absorbée par les meubles et parois.

Le chauffage est contrôlé, comme on l'a vu dans le chapitre I, par des thermostats tout ou rien modulés ou, pour les nouveaux modèles par des thermostats PID (Proportionnel-intégrale-dérivée) qui allument la résistance en fonction de la température d'air enregistrée par une sonde de température. Ces thermostats contrôlent l'appareil de chauffage en fonction de la température. Cependant, leur précision varie car il existe toujours un différentiel statique (« bande morte »).

Cependant le bâtiment où s'insèrent les convecteurs électriques a une dynamique très complexe avec beaucoup de paramètres qui vont influencer directement et indirectement le fonctionnement de ce système. Différentes sources [ash, 1997] [Ari Rabl, 1994] montrent que les charges thermiques du bâtiment sont dues à plusieurs facteurs, notamment : Conduction à travers l'enveloppe, Ventilation, Infiltration, apports solaires et gains internes. Un autre paramètre qui va jouer sur le potentiel de contrôle du chauffage est l'inertie du bâtiment, et en particulier la capacité de stockage de chaleur dans le bâtiment. Ce paramètre donnera ainsi plus ou moins de flexibilité aux systèmes de chauffage en faisant que la température descendra plus ou moins vite dans la pièce et en conséquence que l'inconfort sera atteint plus au moins tard.

A partir de ces données, on présente dans le Tableau 4-2 et dans la Figure 4-2 la représentation ILCA niveau constructeur pour un convecteur électrique.

Tableau 4-2 - Etats de fonctionnement d'un convecteur électrique - niveau Constructeur

Etats de fonctionnement
Off - l'appareil est éteint (mais il peut consommer énergie)
ON - La résistance est allumée. Dans les appareils avec thermostats PI ou PID la puissance de la résistance est modulée.
Active Standby - Pendant le contrôle par le thermostat.

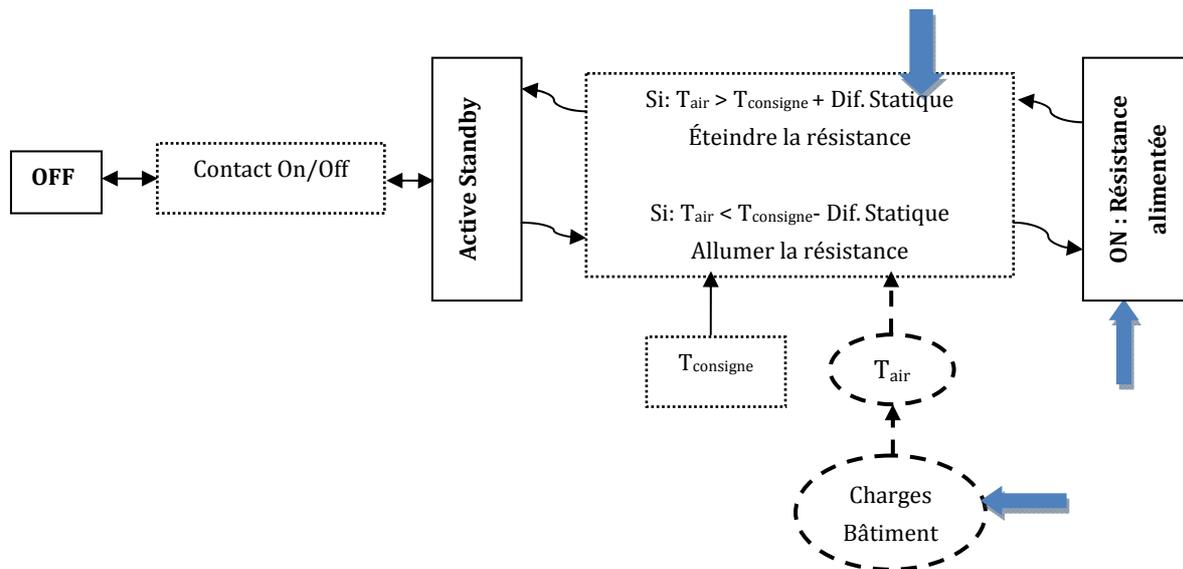


Figure 4-2 - Représentation graphique d'un convecteur électrique - niveau Constructeur

Comme dans le niveau utilisateur, après l'action sur le bouton ON/Off, le convecteur passe en mode *Active standby* où le thermostat va comparer la température de consigne avec la température d'air (mesurée par la sonde de température du convecteur) et ainsi décider si la résistance devra être allumée ou pas. La température d'air dépend non seulement du fonctionnement du convecteur électrique mais aussi de la dynamique thermique du bâtiment.

4.1.2.1. Stratégies déduites à partir de la représentation du niveau constructeur

- **Action sur la résistance électrique**

Une action directe sur la résistance électrique permettra de couper l'alimentation de l'élément le plus gourmand en énergie.

- **Coupure de l'alimentation avec réduction des charges thermiques du bâtiment**

Cette stratégie comprend d'une part, la coupure de la résistance, ou réduction significative de la température de consigne, ou action sur le contact On/Off, et d'autre part une réduction des charges du bâtiment à travers la coupure de la ventilation du bâtiment. Ainsi la température d'air va descendre plus doucement et permettre un effacement plus long sans affecter le confort thermique. Ceci suppose de mettre en place un système assurant la qualité d'air tout au long de l'effacement.

- **Coupure de l'alimentation avec condition de bande morte**

Coupure du chauffage en agissant sur le contact On/Off, la résistance électrique ou sur la température de consigne (réduction significative) après la réception d'un ordre d'effacement de la part d'un contrôleur extérieur. Cet ordre ne sera suivi que lorsque la température est égale à la température de consigne plus le différentiel de température. En d'autres termes, après la réception du signal d'effacement, l'effacement sera effectif seulement quand la température mesurée par la sonde de température de l'équipement aura atteint la température de consigne plus le différentiel de température (« bande morte »). Donc la condition d'effacement peut s'écrire de la façon suivante :

$$\text{si commande}_{\text{effacement}} = \text{reçu}$$

$$\text{si } \text{Température}_{\text{air}} = \text{Température}_{\text{consigne}} + \Delta T \text{ (différentiel statique)}$$

Effacement valide ✓

Cette stratégie permet ainsi de bénéficier d'un écart de température maximum entre la température d'air au début de l'effacement et un seuil défini pour évaluer l'inconfort. Un autre avantage pourra être le foisonnement créé lors du démarrage du chauffage, quand cette stratégie sera appliquée à un ensemble de bâtiments.

- **Utilisation de l'inertie du bâtiment pour réaliser un effacement ou une réduction de la consigne**

Comme dans le cas précédent on va couper le chauffage en agissant sur un des trois points : sur le contact On/Off, consigne ou sur la résistance. Une autre option serait la réduction de la consigne pour éviter que la température ne devienne trop faible.

Cependant, avant d'effectuer cette coupure, on augmentera la consigne pendant un certain temps pour stocker la chaleur dans le bâtiment. De cette façon, au moment de la coupure, la température sera plus haute et le bâtiment plus chargé en chaleur, ce qui va permettre une plus grande flexibilité en termes de temps de coupure sans affecter le confort des occupants.

4.2. Caractéristiques des bâtiments simulés

Le parc de bâtiments résidentiels avec chauffage électrique est constitué par des bâtiments avec de différentes périodes de construction. La distribution des bâtiments équipés de chauffage électrique a été donnée dans le projet IMPROBUILD [Nemry & Uihlein, 2008] et elle est présentée sur la figure suivante.

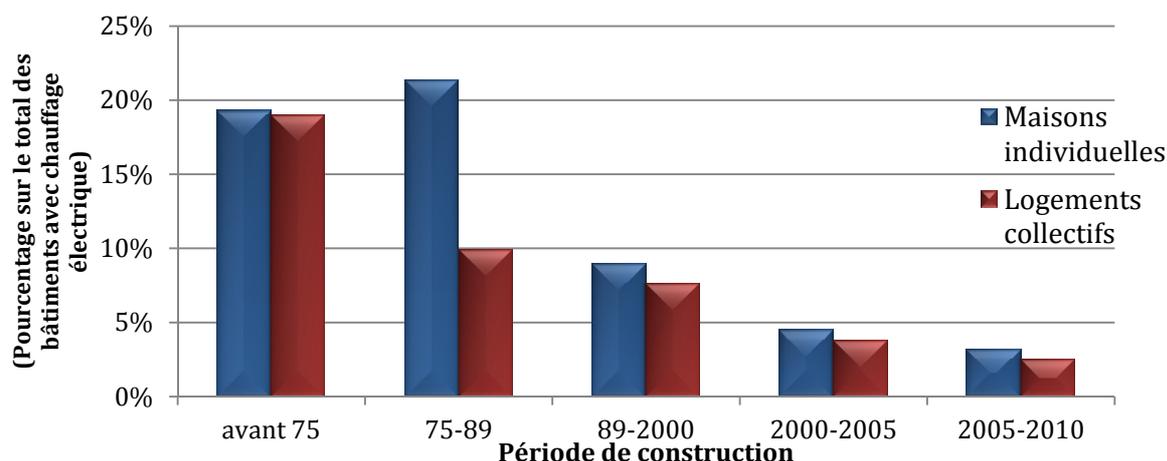


Figure 4-3 – Pourcentage de bâtiments avec chauffage électrique par période de construction

Dans la Figure 4-3, on peut voir qu'on a divisé les bâtiments selon deux groupes différents, des logements collectifs et les maisons individuelles. Les bâtiments construits avant l'année 2000 représentent 86 % du parc Français. De plus, presque 40 % des bâtiments existants ont été construits avant 1975 et leur construction ne répond à aucune réglementation thermique (RT). Les caractéristiques thermiques des bâtiments pour les autres périodes de construction considérées dans cette étude, correspondent aux caractéristiques moyennes des réglementations thermiques appliquées à chaque période de construction.

Les valeurs des caractéristiques thermiques des bâtiments français peuvent être trouvées dans [Traisnel, 2001]. Les valeurs considérées dans notre étude sont présentées ci-dessous:

Tableau 4-3 – Coefficients de transfert thermique global des différents parois

		Avant 1975	RT 1975	RT 1989	RT 2000	RT 2005
<i>U - Coef. de transfert thermique global [W/m².K]</i>	<i>Murs extérieurs</i>	1.75	0.8	0.65	0.35	0.3
	<i>Toiture</i>	1.5	0.65	0.4	0.3	0.25
	<i>Plancher</i>	1.5	0.75	0.45	0.3	0.25
	<i>Fenêtres</i>	5	4.8	2.45	2	1.75

On considère que chaque mur, à l'exception des murs intérieurs, est constitué par deux couches : une couche d'isolant et une autre de béton.

Pour les parois extérieures, on considère que la couche d'isolant est positionnée à l'intérieur.

Dans le plancher et dans la toiture, l'isolation se fait toujours par l'extérieur.

Pour respecter les valeurs des coefficients de transfert thermique globaux du Tableau 4-1, l'épaisseur de chaque couche d'isolant est ajustée.

Le tableau suivant donne les caractéristiques des matériaux utilisés dans notre étude.

Tableau 4-4 – Caractéristiques des matériaux utilisées

Béton	Epaisseur murs verticaux [m]	0.1
	Epaisseur murs horizontaux [m]	0.1
	Conductivité (kJ/h.m.K)	6.32
	Chaleur spécifique (J/kg.K)	920
	Densité (Kg/m ³)	2300
Isolant	Conductivité (kJ/h.m.K)	0.11
	Chaleur spécifique (J/kg.K)	840
	Densité (kg/m ³)	35
Parois intérieures (Ciment)	Epaisseur murs verticaux [m]	0.05
	Conductivité (kJ/h.m.K)	2.088
	Chaleur spécifique (J/kg.K)	1008
	Densité (kg/m ³)	1900

On ne considère qu'une pièce dans notre modèle de simulation. Toutefois, deux types de bâtiments sont étudiés, des appartements et des maisons individuelles. La différence entre eux c'est que, pour les bâtiments du type appartement, il y a seulement une paroi (mur extérieur vertical) qui donne vers l'extérieur. Toutes les autres parois sont considérées comme internes et adiabatiques.

Pour les maisons individuelles, le plancher et le plafond ne sont pas des murs intérieurs, mais ce sont des murs donnant vers l'extérieur et leurs caractéristiques correspondent aux valeurs du Tableau 4-3. Les dimensions de la pièce simulée sont exposées dans la Figure 4-4.

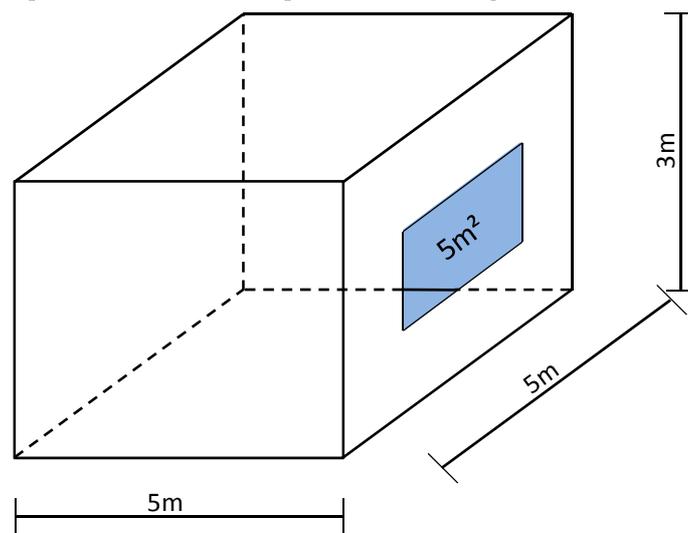


Figure 4-4 – Dimensions de la pièce simulée

Les valeurs du débit d'air dû à la ventilation, le coefficient d'échange par convection intérieur, le coefficient d'échange superficiel extérieur et le coefficient d'absorption utilisés dans nos simulations sont présentés dans le Tableau 4-5.

Tableau 4-5 – Valeurs de ventilation et caractéristiques des échanges superficielles

Débit de ventilation [Vol/h]	0.6
Coef. d'échange par convection intérieure " h_{int} " [W/m ² .K]	3.84
Coef. d'échange global extérieur " h_{ext} " [W/m ² .K]	25
Coefficient d'absorption " α "	0.6

La valeur nominale des gains internes est fixée à 11.5 W/m². Cela représente la chaleur sensible libérée par deux personnes (90W/personne), plus 110 W libérés par des équipements présents dans la pièce. Le profil des gains internes est représenté sur la Figure 4-5.

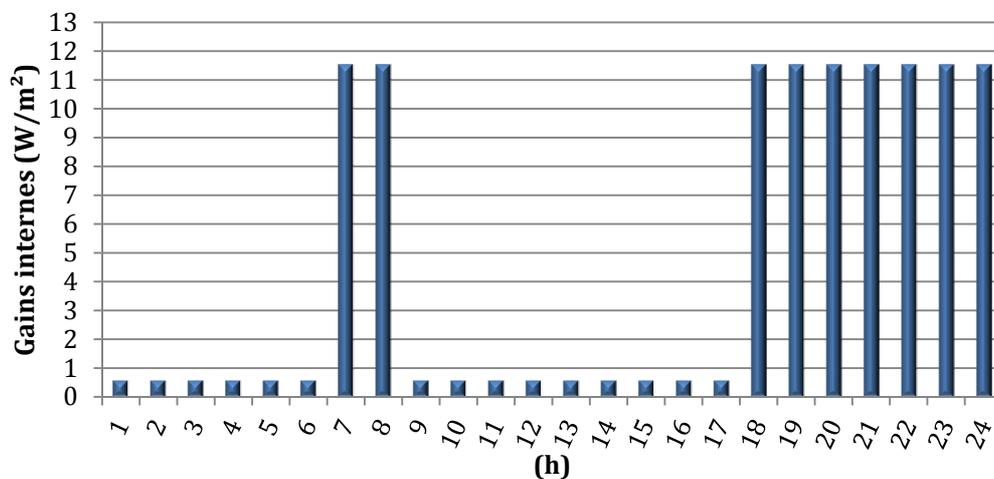


Figure 4-5 – Profil des gains internes (personnes et équipements)

Pendant les absences ou heures de faible activité (par exemple sommeil), on considère que les gains internes correspondent à 5 % de leur valeur nominale.

A la capacité de l'air, nous avons ajouté une capacité supplémentaire pour prendre en compte la capacité des meubles et autres objets présents dans la pièce. Pour déterminer la valeur de la capacité à ajouter, nous nous sommes basés sur des études de modèles inverses existants [Savery & Lee, 1996], [Coley & Penman, 1992], [Charron & Athienitis, 2007] et [Lee & Braun, 2008c]. Sachant que les modèles utilisés dans ces études sont bien plus simples (moins de variables), ils prennent tous en compte la température de l'air dans un seul nœud. Ainsi on a trouvé des valeurs pour la capacité du nœud d'air de l'ordre de 15 jusqu'à 40 fois la capacité de l'air. Cependant il faut dire que quelques unes de ces valeurs ont été trouvées pour des bâtiments tertiaires et que la valeur exacte à utiliser reste inconnue. Dans notre cas de référence, on a pris comme hypothèse que la valeur de la capacité du nœud d'air est de 20 fois la capacité de l'air.

Relativement à la consigne de température d'air, on a choisi une consigne constante égale à 21.5 °C. Cette valeur va nous permettre dans les simulations d'avoir une température opérative (température résultante sèche) confortable.

D'autre part, le choix d'une consigne constante va nous permettre une comparaison des différentes stratégies selon le point de vue le plus favorable pour l'effacement. Ainsi, on ne prend pas en compte dans notre études les effets des intermittences journalières, ni les intermittences hebdomadaires (Par exemple le ralenti pendant le weekend) lors de la mise en œuvre des stratégies de contrôle.

L'orientation de la paroi extérieure pour le cas de référence a été choisie au nord.

4.3. Etude de l'impact des différentes stratégies de contrôle

On va s'intéresser maintenant à l'analyse des impacts des différentes stratégies de contrôle. Pour chaque stratégie, on regardera premièrement les effets énergétiques en détail et ensuite on s'intéressera à la problématique de l'inconfort thermique.

Les résultats présentés dans ce chapitre ont été simulés pour le climat de la ville de Trappes en France (Données météorologiques normalisées « *Meteonorm* » [Meteotest, 2006] pendant les mois de janvier et février pour les deux types de bâtiments (maison individuelle et appartement) et pour les différentes périodes de construction.

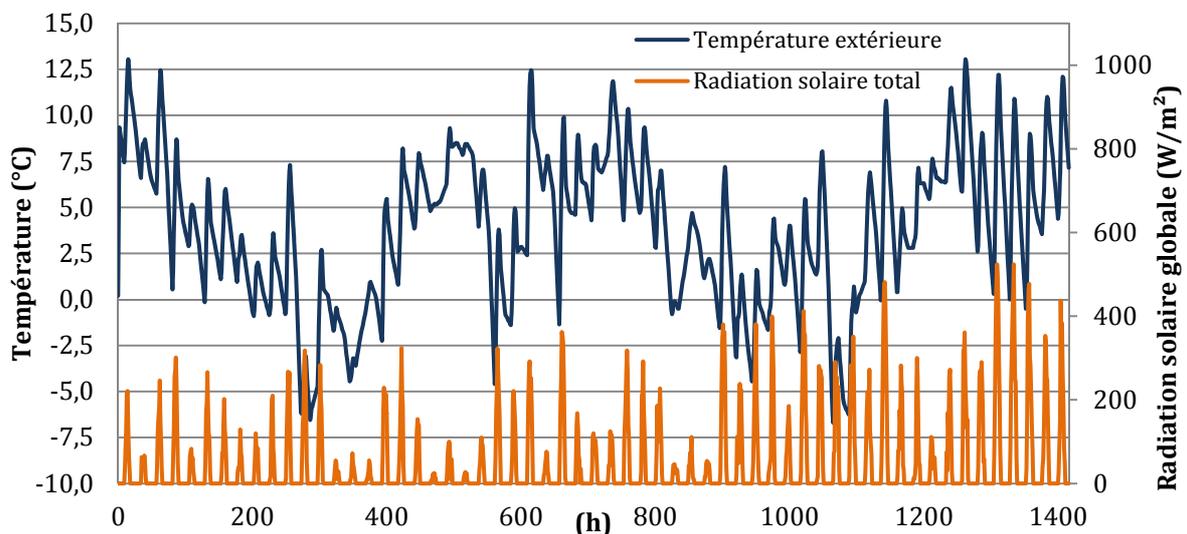


Figure 4-6 - données météorologiques pour les mois de janvier et février - Ville de Trappes

La modélisation pendant les mois de janvier et février (Figure 4-6) va nous permettre de déterminer les impacts des différentes stratégies pour des températures extérieures différentes.

Pour pouvoir déterminer les impacts des différentes stratégies, on réalise deux simulations en parallèle, avec et sans stratégie de contrôle. Cependant le fonctionnement des thermostats du bâtiment sans stratégie de contrôle (Température de consigne toujours constante) et du bâtiment avec stratégie de contrôle sont déphasés lors de l'application d'une stratégie de contrôle.

Ainsi, à la fin du période d'analyse des effets dus à l'application d'une stratégie (7 heures de chaque jour) les deux simulations sont synchronisées. Cette synchronisation va permettre que quand une stratégie de contrôle est à nouveau appliquée la température soit la même pour les deux simulations.

On rappelle ensuite la définition des différents indicateurs qui nos permettront d'analyser les impacts sur la consommation électrique et sur le confort des occupants.

Indicateurs de consommation :

- *Impact énergétique [kWh]* - Différence entre la consommation d'énergie du cas de référence et le cas où la stratégie de contrôle est appliquée, pendant la période d'application de la stratégie de contrôle correspondant à une réduction de la consommation.
- *Surconsommation [kWh]* - Différence entre la consommation d'énergie du cas de référence et le cas où la stratégie de contrôle est appliquée, pour la période avant (cas du préchauffage du bâtiment avant la mise en œuvre d'une stratégie de contrôle) et après la réduction de consommation due à l'application d'une stratégie de contrôle.
- *Recouvrement [%]* = $\frac{\text{Surconsommation}}{\text{Impact énergétique}} \times 100$: cet indicateur quantifie la partie d'énergie qui a été consommée après et avant l'application de la stratégie de contrôle (surconsommation) par rapport à la phase où la réduction de la consommation s'est produit (Impact énergétique).

Indicateurs de la puissance appelée pendant la phase de récupération :

- *Temps à pleine puissance (1^{er} phase) [min]* - cet indicateur représente le temps durant lequel le chauffage fonctionne en continu après la mise en œuvre d'une stratégie. Cet indicateur peut être appliqué aussi avant la période où il existe une réduction de consommation par rapport au cas de référence (cas du préchauffage du bâtiment).

Indicateur de l'inconfort thermique :

- *Temps par jour en dehors la zone de confort [min]* - cet indicateur permet de calculer le temps passé en dehors de la zone de confort par jour.
- *Degrés-heure d'inconfort (DH)* = $\int \text{Max}[(T_{\text{Limite de la zone de confort}} - T_{op}), 0] dt$

Ces indicateurs seront exprimés en fonction de la différence de température (DT) entre la température de l'air intérieure au début de l'application de la stratégie et la température extérieure moyenne pendant la coupure. La représentation des résultats en fonction de cette différence de température, nous permettra d'analyser et évaluer les impacts de chaque stratégie selon différents conditions météorologiques.

4.3.1. Etude de la Coupure Simple du chauffage électrique

A présent, on analyse les impacts dus à une coupure du chauffage électrique. Comme on l'a vu dans le chapitre I, les pointes journalières se trouvent généralement entre 18 heures et 20 heures. Ainsi, on a évalué l'effacement du chauffage électrique pendant ces deux heures. Cette coupure peut être matérialisée par une coupure de l'alimentation ou une mise à zéro de la consigne de température du chauffage électrique.

La phase de récupération est mesurée pendant 10 heures, soit jusqu'à 6 heures du matin suivant.

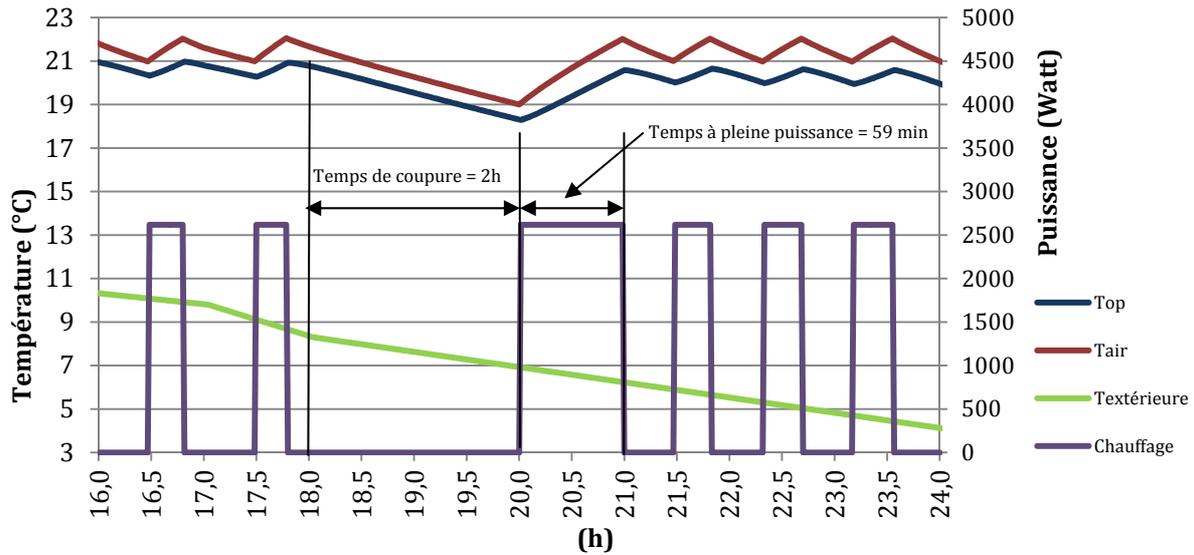


Figure 4-7 – Représentation des évolutions de température et des appels de puissance

La Figure 4-7 montre un exemple de l'évolution de la température lors de la coupure du chauffage. Comme on peut le voir, après la coupure, le chauffage va fonctionner à plein régime pendant 59 minutes, tandis que le chauffage reste allumé pendant 25 minutes sans coupure.

Le temps des cycles marche/arrêt va dépendre fortement de l'inertie du nœud d'air. Si on considère seulement la masse d'air comme la partie du nœud d'air ayant une inertie, ce temps de fonctionnement peut être réduit à une ou deux minutes. Dans ce cas, comme la température d'air évolue très rapidement, le temps à pleine puissance après la coupure sera plus réduit que dans les cas où l'inertie des meubles est ajoutée.

4.3.1.1. Impacts sur la consommation

Dans ce qui suit, on présente les résultats en termes énergétiques pour les deux types de bâtiments (Appartements et Maison Individuelle) et pour les différents périodes de construction.

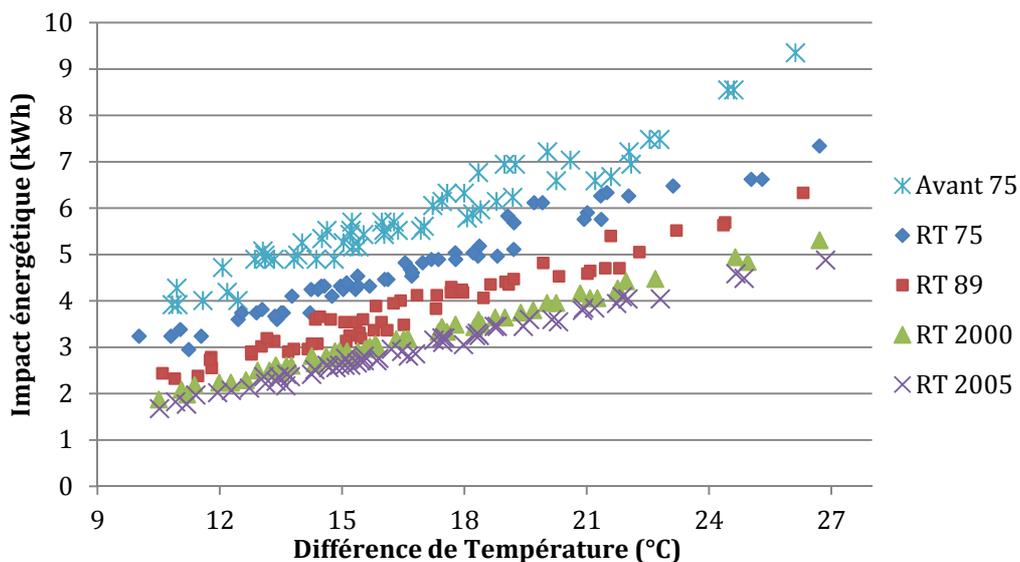


Figure 4-8 – Impact énergétique – Maison individuelle

Pendant la coupure, on ne va pas consommer d'énergie car le chauffage est éteint. La Figure 4-8 montre les impacts énergétiques (consommation évitée pendant l'application de la coupure) pour une maison individuelle. L'évolution de l'impact d'énergie en fonction de la différence de température (DT) est globalement linéaire. Cette évolution est due au fait qu'il y a une relation linéaire avec les besoins de chauffage et la température extérieure.

Pour les bâtiments plus anciens (« Avant 75, RT 75 et RT 89 »), on observe une légère perturbation à l'évolution linéaire des impacts énergétiques car ces bâtiments sont équipés de chauffage avec des thermostats moins précis. Les systèmes de chauffage simulés dans ces bâtiments ont un différentiel de température de 0.5 °C au lieu de 0.1 °C pour les bâtiments récents. Ainsi, lors de la coupure du chauffage, la différence de température (DT) calculée peut présenter un écart jusqu'à 0.5 °C. Cette erreur va être responsable de la dispersion présentée dans la Figure 4-8.

Si on simule les bâtiments anciens avec un système de chauffage ayant une meilleure précision de mesure, cette dispersion va presque entièrement disparaître. Ainsi on peut dire que la dispersion observée dans la Figure 4-8 est d'avantage due au système de chauffage généralement utilisé dans ces logements qu'au bâtiment lui-même.

Si des évaluations avaient été faites avec un modèle basé sur des besoins de chauffage on n'aura pas pu observer cette dispersion.

Du fait que les bâtiments les plus anciens consomment plus d'énergie, la consommation évitée est plus grande pour ces bâtiments et plus faible pour les bâtiments plus isolés.

Après la coupure, le système de chauffage va faire remonter la température de la pièce jusqu'à la température de consigne, consommant plus d'énergie dans cette période de temps, que dans le cas où aucune stratégie n'est appliquée. La figure suivante montre cette la surconsommation d'énergie due à la coupure du chauffage électrique.

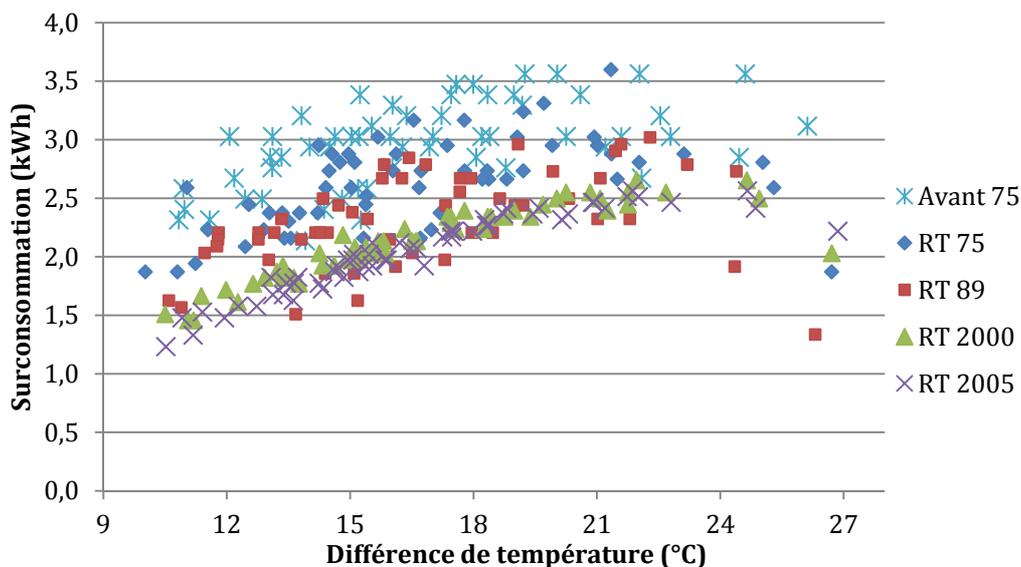


Figure 4-9 – Surconsommation – Maison individuelle

La surconsommation a tendance à augmenter avec la différence de température (DT) pour tous les bâtiments. Cette augmentation reste linéaire et avec un peu de dispersion pour les bâtiments récents (« RT 2000 et RT 2005 ») à cause des systèmes de chauffage utilisés.

Pour des différences de température élevées, on peut distinguer une réduction de la surconsommation. En effet, pour ces températures, la simulation de référence (sans coupure) sera plus proche d'un fonctionnement sans cyclage (consommation continue d'électricité). Le fonctionnement du chauffage dans la simulation sans coupure est ainsi proche de la saturation (Fonctionnement sans cyclage). Après la coupure, la différence entre la consommation de la simulation avec coupure et la simulation sans coupure devient plus faible. Comme résultat, on observe une diminution de la surconsommation pour des températures extérieures très faibles.

Une fois analysé l'impact énergétique et la surconsommation, on va analyser le taux de recouvrement (Figure 4-10).

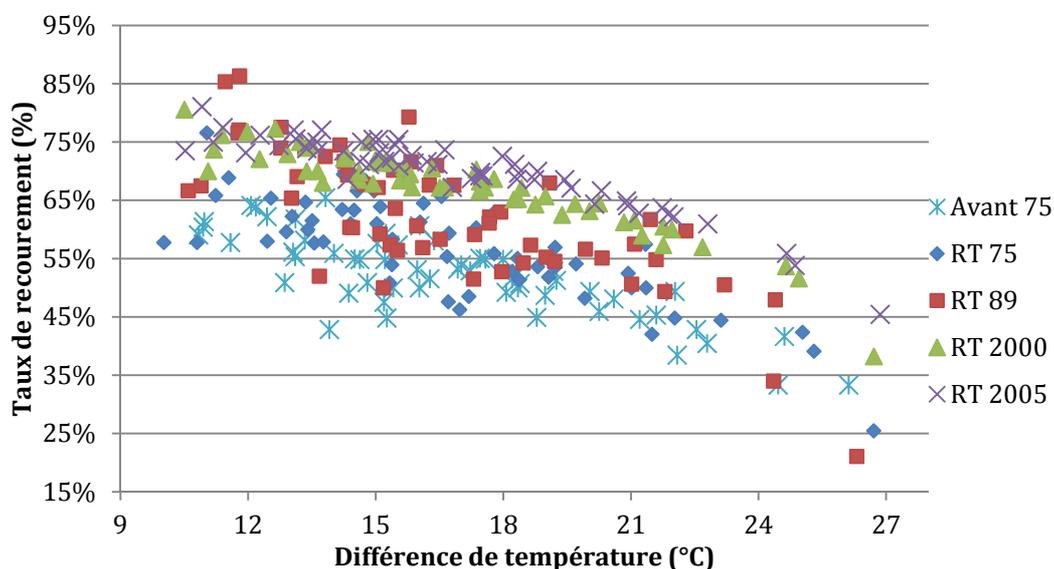


Figure 4-10 – Effet de recouvrement – Maison individuelle

D'abord, on peut remarque que le taux de recouvrement diminue avec la différence de température. On observe qu'il existe une dispersion pour les bâtiments anciens car pour les mêmes valeurs de DT, le recouvrement présente des valeurs très différentes (spécialement pour des bâtiments RT 89).

Des valeurs supérieures à 100 % peuvent apparaitre du fait de l'inertie et des amplitudes de température extérieure importantes. Dans le cas étudié, la consommation est « déplacée » de deux heures. De plus, il faut remonter le bâtiment en température. Ce déplacement lié à l'inertie du bâtiment a comme conséquence, qu'on va chauffer le bâtiment pendant quelques heures après la coupure. Ainsi, la surconsommation devient plus importante que l'impact énergétique et donc l'effet de recouvrement devient supérieur à 100%. Un de ces cas est montré dans la figure suivante.

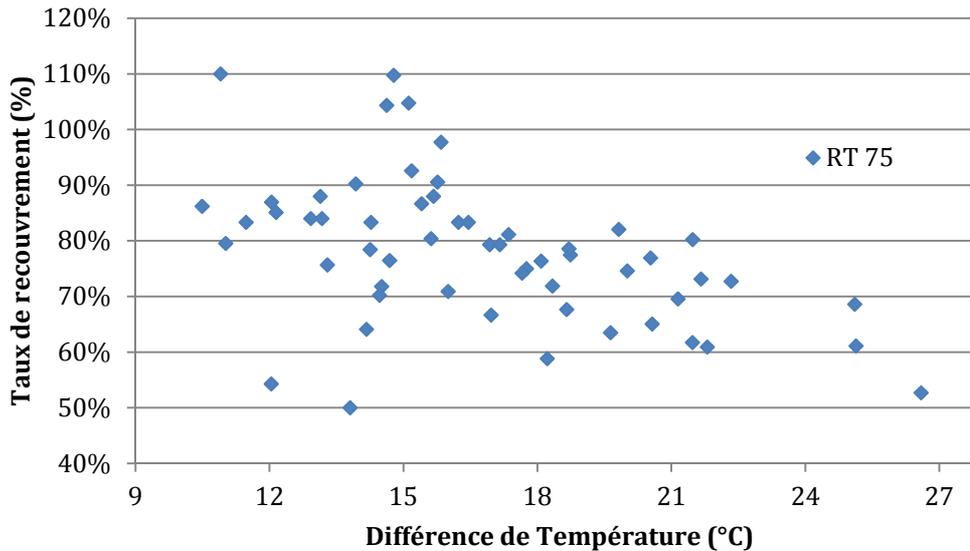


Figure 4-11 – Effet de recouvrement - Appartement

Les simulations des appartements considèrent le plafond et le plancher comme adiabatiques car ils sont en contact avec d'autres zones (considérées à la même température), donc la pièce simulée a une inertie plus importante. Comme on peut le voir sur la Figure 4-11, il y a quatre jours où l'effet de recouvrement dépasse les 100%. C'est-à-dire que pour ces quatre jours, on a consommé plus que le cas de référence (sans coupure). Plus inerte le bâtiment est, plus l'effet de recouvrement devient accentué.

Dans le cas particulier des bâtiments très inertes, très bien isolés et pendant des jours avec des températures positives (environ 10 à 5 °C), la vitesse à laquelle la température descend devient très faible. Pour ces bâtiments, on peut trouver des effets de recouvrement très proches de zéro, car lors de la coupure, la température diminue lentement et de ce fait la température de l'air ne descend pas en-dessous du différentiel du thermostat. Ainsi, le chauffage, dans la simulation sans coupure, restera éteint pendant presque toute la durée du contrôle. Dans ce cas l'impact énergétique de la coupure est proche de zéro.

Le tableau suivant résume les résultats moyens sur deux mois pour le recouvrement, l'impact énergétique et la surconsommation.

Tableau 4-6 – Valeurs moyennes des impacts sur la consommation

		Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
Maison individuelle	Recouvrement (%)	52%	57%	62%	67%	70%
	Impact énergétique [kWh]	5,78	4,70	3,79	3,20	2,94
	Surconsommation [kWh]	2,95	2,61	2,28	2,11	2,03
Appartement	Recouvrement (%)	70%	78%	78%	81%	82%
	Impact énergétique [kWh]	3,00	2,80	2,35	1,98	1,84
	Surconsommation [kWh]	2,09	2,14	1,78	1,58	1,50

L'effet de recouvrement pour les cas de référence reste compris entre 52 et 70 % pour la maison individuelle et entre 70 et 82 % pour l'appartement.

L'appartement a un effet de recouvrement plus important car il y a plus d'inertie. On peut aussi observer que l'effet de recouvrement augmente aussi pour les bâtiments plus récents.

Pourtant, il faut dire que les bâtiments plus isolés auront aussi une consommation et une puissance installée plus faibles.

La maison individuelle permet « d'économiser » pendant la coupure plus d'énergie car il y a plus de déperditions, mais la surconsommation lors de la mise en route du chauffage sera également plus élevée.

Après la coupure, pour faire remonter la température d'air à la valeur de la consigne, le chauffage fonctionne à pleine puissance. La figure suivante montre les temps moyens à pleine puissance après la coupure en fonction de la différence de température, entre l'air intérieur et l'air extérieur.

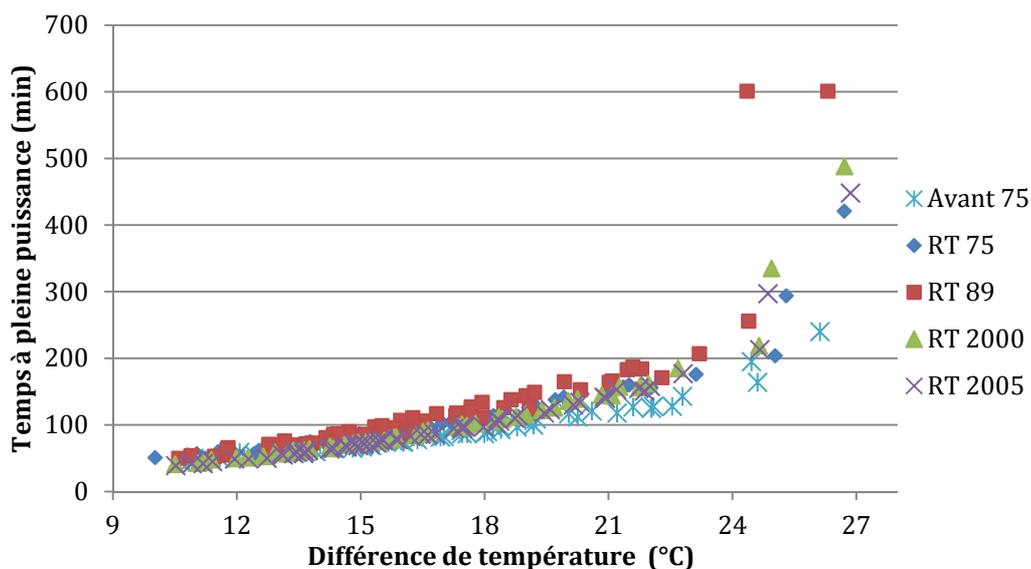


Figure 4-12 – Evolution du temps à pleine puissance – maison individuelle

La Figure 4-12 montre que la relation entre le temps à pleine puissance et la différence de température a une dispersion faible. Cependant, pour des différences de température (DT) élevées le temps à pleine puissance augmente exponentiellement, car la puissance du chauffage n'est pas suffisante pour remonter la température à la valeur de consigne dans un temps court. Or, sans coupure le chauffage fonctionne déjà presque sans cyclage, le manque de puissance oblige que le temps à pleine puissance soit très élevé pour rattraper la température de consigne.

On peut voir que pour le bâtiment « RT 89 » le chauffage reste allumé sans cycler pendant toute la période d'évaluation du recouvrement, soit 10 heures (600 minutes).

On peut connaître avec précision le temps à pleine puissance pour un bâtiment, uniquement pour des DT < 24 °C (Figure 4-12). La figure suivante montre le temps moyen, sur deux mois, à pleine puissance pour les différents bâtiments et périodes de construction.

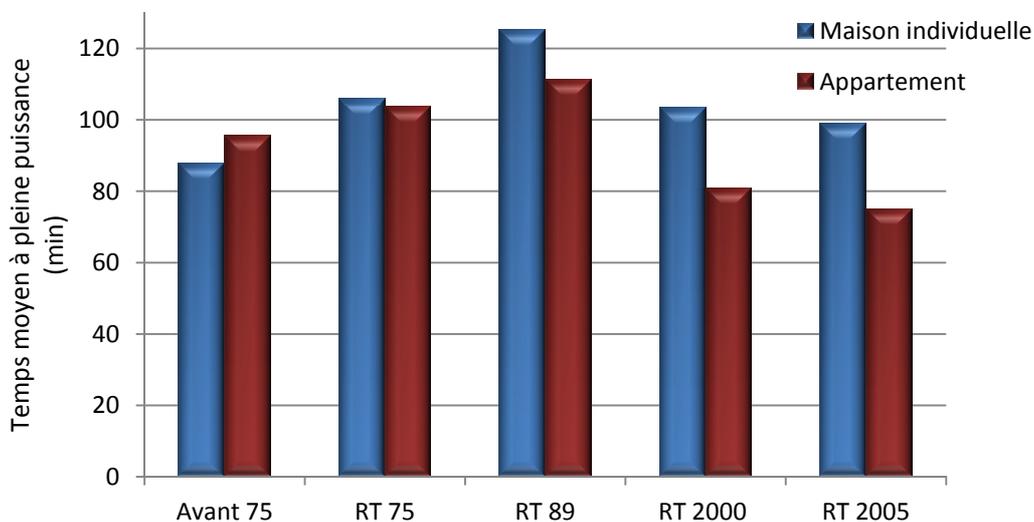


Figure 4-13 – Valeurs moyennes du temps de fonctionnement à pleine puissance après la coupure

Pour les deux types de bâtiments (Maison individuelle et appartement) simulés, le temps à pleine puissance moyenne augmente avec la période de construction jusqu'à la «RT 89, qui présente les valeurs les plus élevées. Ensuite, avec les caractéristiques « RT 2000 » et « RT 2005 » le temps à pleine puissance devient plus faible et la différence également. En moyenne, tous les bâtiments restent au mois 75 minutes à pleine puissance après la coupure.

4.3.1.2. Impact sur le confort thermique

Maintenant on va s'intéresser à l'analyse des impacts de la coupure du chauffage sur le confort thermique.

Comme on l'a vu dans 3.4, la température opérative et la température des murs peuvent être considérablement différentes. La consigne de température d'air choisie a été fixée à 21.5 °C, mais la température des parois en contact avec l'extérieur peut être très différente. Dans la figure suivante on peut voir l'évolution des températures des surfaces pour les différentes parois et par l'air un jour très froid (-6,5 °C) pour une maison individuelle « d'avant 75 ».

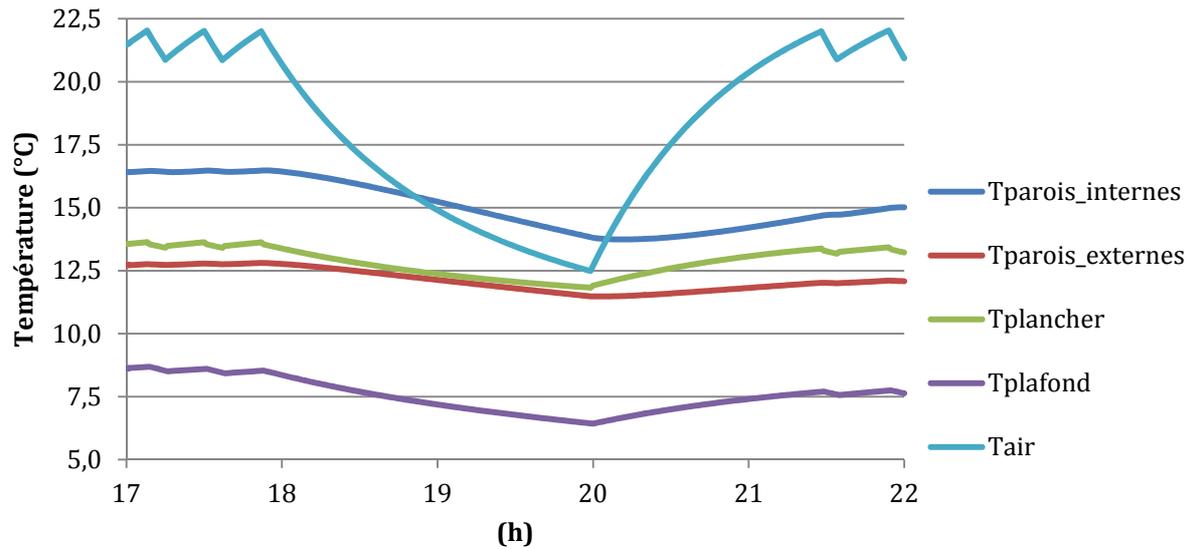


Figure 4-14 – Températures de l'air et des surfaces intérieures des différentes parois lors d'une coupure par un jour très froid – Maison individuelle « Avant 75 »

Dans la Figure 4-14, on voit qu'au début de la coupure (18 heures) la température de l'air correspond à la température de consigne. Comme ce type de bâtiment ne présente presque pas d'isolation la température des murs est très faible.

Les parois en contact avec l'extérieur ont des températures très basses, 11,5 et 6,5 °C pour la paroi extérieure et le plafond respectivement. Comme le plancher est en contact avec le sol qui a une température constante et égale à 12 °C, la température de cette paroi est plus élevée. Les parois intérieures ont la température la plus élevée lors de la coupure.

Ainsi, il arrive que dans les bâtiments anciens la température opérative pendant les jours les plus froids devienne inférieure à 18 °C même si la température d'air reste à 21.5 °C. Subséquemment, lors de la coupure, le bâtiment est déjà en situation d'inconfort.

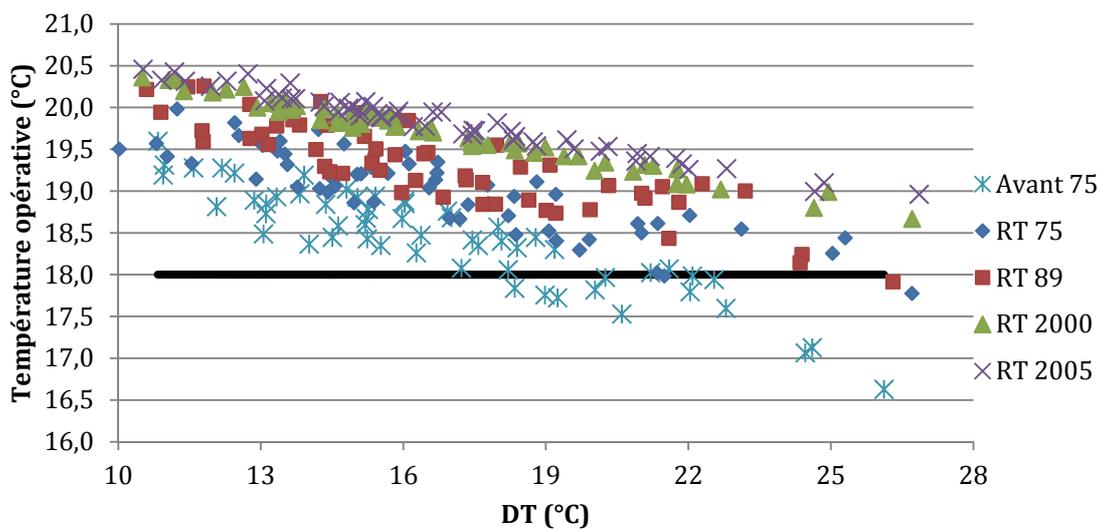


Figure 4-15 – Températures opératives lors de la coupure – maison individuelle

Sur la Figure 4-15 on peut analyser les températures opératives d'une pièce au début de la coupure. Pour les bâtiments construits avant 1975, pour des différences de température supérieures à 18 °C, la pièce présentera des conditions inconfortables même sans effectuer la coupure. Au total, 13 jours ont présenté des températures inférieures à 18°C pour les bâtiments construits « Avant 75 », deux jours pour les bâtiments « RT 75 » et un jour pour les bâtiments « RT 89 ».

On peut donc imaginer que, si la température est proche de 18°C, avec la coupure du chauffage électrique, le temps hors confort sera très élevé. Cet effet est du en partie à l'utilisation d'un système de chauffage purement convectif (convecteur électrique). Si un panneau rayonnant est utilisé, 40 % de la puissance émise est absorbée par les parois, Dans ce cas le nombre de jours où la température opérative est inférieure à 18 °C est réduit de 13 à 5 jours pour les bâtiments « Avant 75 ». On peut ainsi dire que le panneau rayonnant permet d'avoir un meilleur confort thermique pour la même température de consigne.

Ci-après, on présente le temps hors confort en fonction des différentes périodes de construction selon la différence de température (DT).

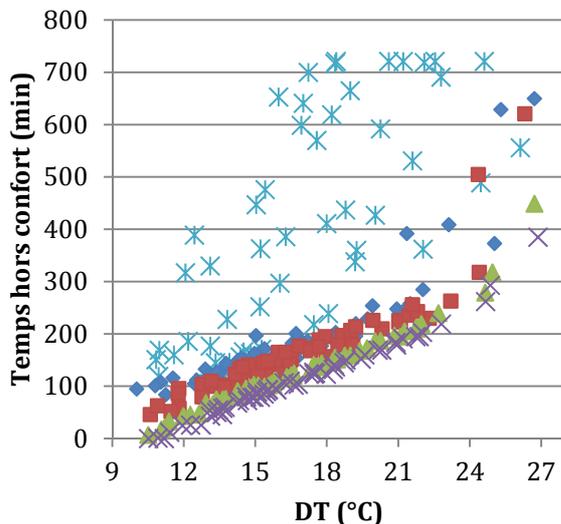


Figure 4-16 - Temps hors confort - Maison Individuelle

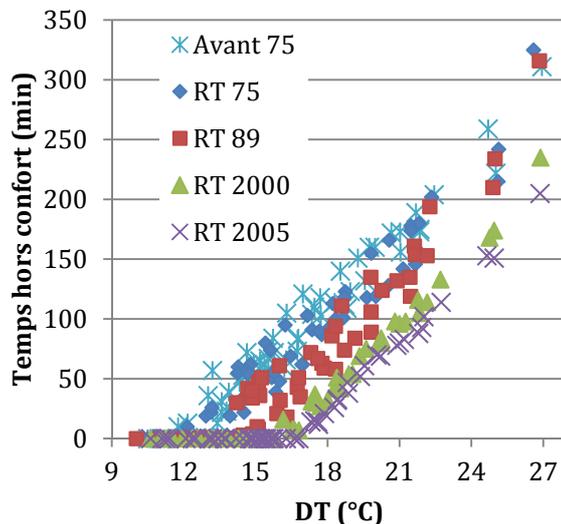


Figure 4-17- Temps hors confort - Appartement

Examinons d'abord les maisons individuelles. A l'exception des bâtiments « Avant 75 », le temps hors confort pour des maisons individuelles pour les autres périodes de construction reste plus au moins semblable. Néanmoins, pour les maisons individuelles on peut effectuer une coupure sans provoquer aucun inconfort, pour les bâtiments « RT 2005 », si on se limite à trois jours (pour un DT inférieure à 10 °C). On constate sur la Figure 4-16 que, les bâtiments construits avant 75 atteignent une limite supérieure. Pour des températures extérieures basses, ces bâtiments présentent des conditions inconfortables même sans coupure, et les valeurs du temps hors confort atteignent cette valeur maximale, soit deux heures de coupure 10 heures (pour le calcul de la surconsommation), i.e. 720 minutes.

Cependant, si on prend en compte le bâtiment type Appartement, on peut voir que du fait de l'inertie plus élevée, le temps hors confort est beaucoup moins grand et qu'on a beaucoup plus de jours sans inconfort. Même pour des bâtiments construits avant 75, on peut réaliser des coupures sans inconfort seulement pour cinq jours.

Le tableau suivant donne les résultats moyens en termes de temps hors confort et de degrés heures d'inconfort.

Tableau 4-7 – Valeurs indicatives de l'inconfort

		Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
Maison individuelle	<i>Temps hors confort [min]</i>	374	193	165	127	111
	<i>DH</i>	10,24	6,90	5,15	3,18	2,47
Appartement	<i>Temps hors confort [min]</i>	92	81	62	36	28
	<i>DH</i>	2,09	1,62	1,02	0,46	0,33

Les valeurs du Tableau 4-7 montrent que l'inconfort généré par la coupure est très élevé avec des valeurs nettement supérieures à une heure. La norme EN 15251 dit que si le bâtiment reste hors de la plage de confort pendant moins de 5% du temps d'occupation par jour, on peut le considérer comme confortable. Dans notre cas, on considère que le bâtiment est occupé pendant 14 heures par jour, ainsi il peut rester 42 minutes hors de la plage de confort. Cependant, même en considérant qu'on peut sortir de cette plage de température pendant 42 minutes, seuls les bâtiments type « appartement » construits selon la RT 2000 ou RT 2005 permettent des coupures sans inconfort inacceptables.

Nous avons aussi analysé la vitesse moyenne à laquelle la température opérative a changé pendant la coupure.

Tableau 4-8 – Vitesse moyenne de changement de température lors de la coupure

<i>Vitesse moyenne [K/h]</i>	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
<i>Maison individuelle</i>	2,83	2,59	2,27	1,99	1,86
<i>Appartement</i>	1,91	1,77	1,51	1,30	1,22

Comme on peut voir sur le Tableau 4-8, les bâtiments les plus anciens (en gros), pour le cas de la maison individuelle, dépassent la vitesse considérée comme limite (2 K/h) pour que les conditions de la norme puissent être appliquées. Ainsi, avec ces trois indicateurs, et en faisant appel également aux valeurs du temps hors confort et aux degrés-heures d'inconfort, on considère que le contrôle du chauffage peut être appliqué très difficilement sans provoquer des sensations d'inconfort chez les occupants.

La figure suivante montre la vitesse moyenne en fonction de la différence de température.

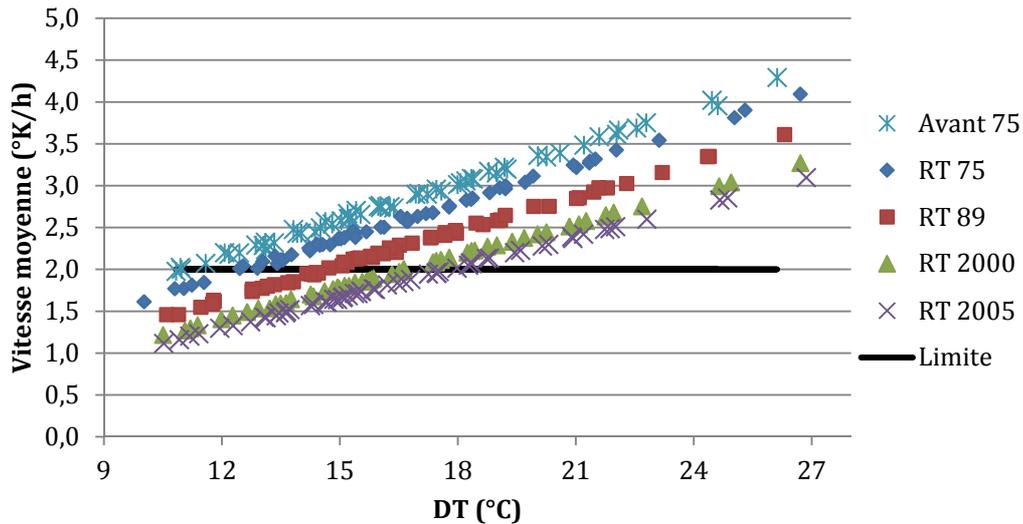


Figure 4-18 – Vitesse moyenne en fonction de « DT » - Maison Individuelle

Sur la Figure 4-18 on peut voir que même pour les bâtiments récents, à partir de 18 °C de différence entre l'intérieur et l'extérieur, la vitesse à laquelle la température opérative va évoluer devient trop grande et ainsi les conditions d'applicabilité des normes de confort ne peuvent pas être réunies.

4.3.1.3. Limite de faisabilité de la coupure du chauffage sur contrainte de confort

Comme on l'a vu, la coupure totale du chauffage électrique entraîne dans la plupart des cas des situations inconfortables. Ainsi, on a évalué la faisabilité de coupures du chauffage électrique plus intelligentes qui n'affectent pas le confort. Plus précisément, on a réalisé la même étude, mais avec un temps de coupure limité par la température opérative de la pièce à 18°C. La figure suivante montre un exemple de réalisation.

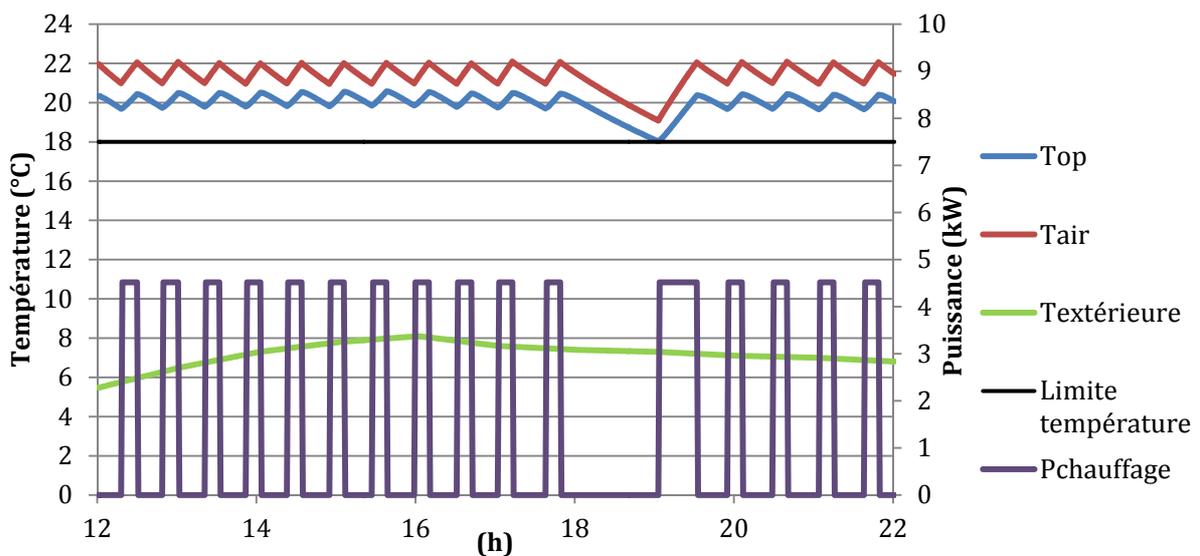


Figure 4-19 – Exemple d'application d'une coupure sans inconfort

Dès que la température de la pièce atteint la limite inférieure de la plage de confort, le chauffage est rallumé.

Bien que l'application précise de cette stratégie reste difficile à mettre en place, cette étude nous permet de connaître les limites théoriques d'application d'une coupure du chauffage électrique. On peut aussi prendre l'hypothèse qu'en cas de dépassement des limites établies par la plage de confort, les occupants auront rallumé le chauffage et ainsi dérogé le signal de coupure.

Ci-dessous, on montre les temps de coupure qui n'affectent pas le confort thermique en fonction de la différence de température (DT).

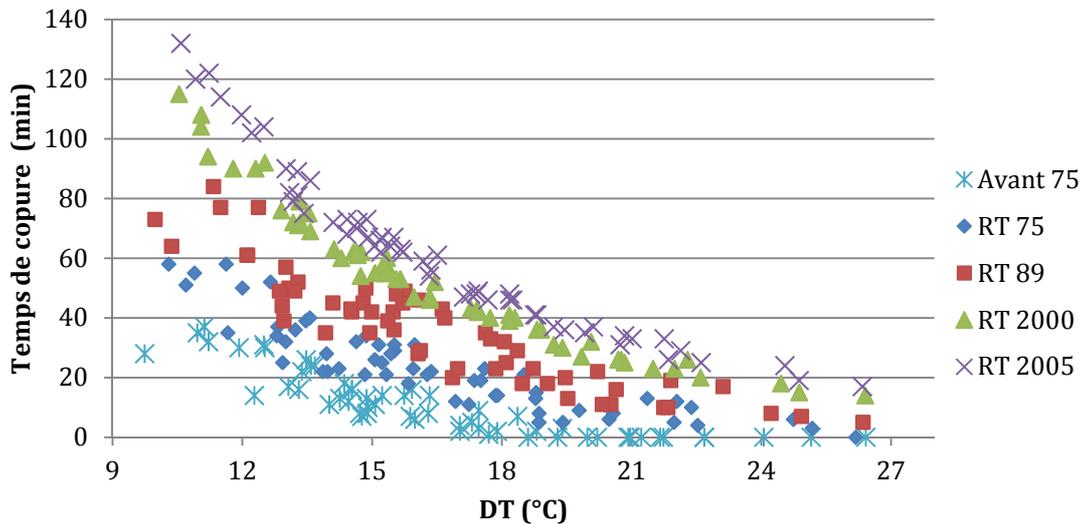


Figure 4-20 – Temps de coupure sans inconfort – Maison Individuelle

Les résultats montrent qu'il y a une évolution en forme exponentielle décroissante. Seuls les bâtiments plus anciens ne permettent pas de coupure pour des DT élevés. Par exemple, le bâtiment « Avant 75 » pour des DT supérieurs à 17 °C ne permet pas de coupure.

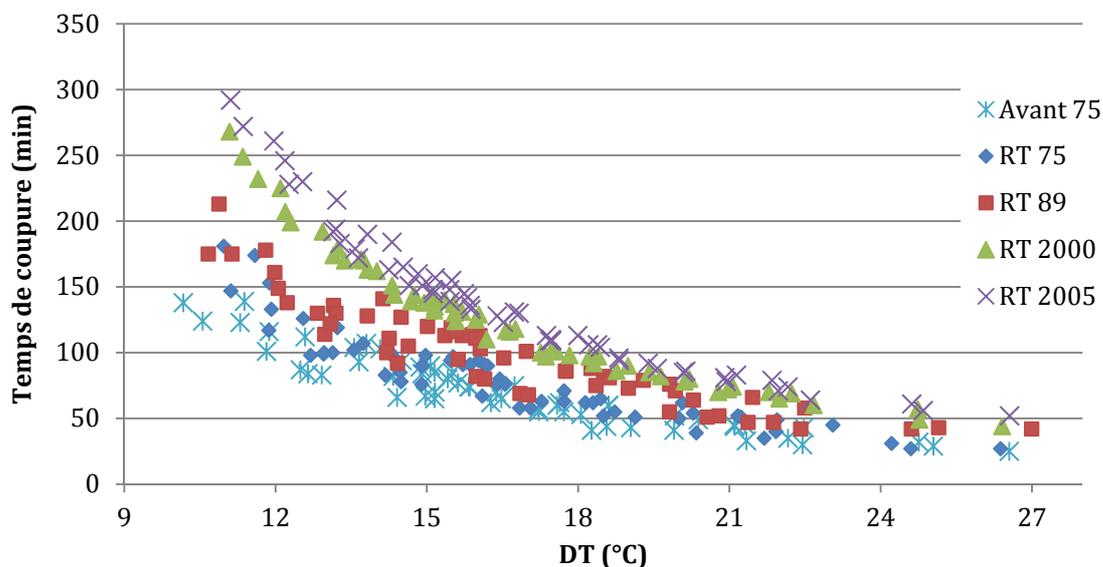


Figure 4-21 - Temps de coupure sans inconfort – Appartement

Comme les bâtiments type « Appartement » ont une inertie plus importante, les temps de coupure deviennent plus importants. Pour ce type de bâtiment, des coupures d'environ 20-30 minutes sont

toujours possibles même pour des différences de température élevés et pour des constructions anciennes.

Puisque le temps de coupure est limité par la température opérative, plus court que dans le cas d'étude précédent (coupure pendant deux heures), les impacts énergétiques ne sont pas les mêmes. Le tableau suivant montre les valeurs de l'impact énergétique et de la surconsommation quand la coupure est effectuée sans inconfort.

Tableau 4-9 – Impact énergétique et surconsommation pour des coupures sans inconfort

		Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
Maison individuelle	Impact énergétique [kWh]	0,41	0,79	0,99	1,23	1,33
	Surconsommation [kWh]	0,38	0,65	0,82	1,03	1,12
Appartement	Impact énergétique [kWh]	1,56	1,71	1,73	1,86	1,91
	Surconsommation [kWh]	1,25	1,39	1,42	1,51	1,54

Les résultats présentés dans le Tableau 4-9 montrent que, les impacts énergétiques et la surconsommation deviennent plus importants pour les bâtiments les mieux isolés. Il faut noter que pour une coupure à temps fixe, les bâtiments anciens génèrent un impact énergétique plus élevé que les bâtiments récents.

Ainsi, on peut dire que les coupures soumises à des contraintes de confort renversent le potentiel de coupure. Si on fait une comparaison en termes absolus entre coupure soumise à une contrainte de confort et la coupure à durée fixe (2 heures), on vérifie que les impacts énergétiques et la surconsommation sont jusqu'à cinq fois inférieurs.

Ainsi les coupures sans inconfort offrent une faisabilité, en termes d'acceptation de la part des occupants, mais leur impact énergétique en termes absolus est beaucoup plus faible.

4.3.1.4. Discussion – Coupure du chauffage électrique

L'analyse de la coupure du chauffage électrique nous a permis de quantifier les impacts énergétiques de la coupure du chauffage en fonction des différentes périodes constructives.

On a observé que l'effet de recouvrement augmente avec l'isolation du bâtiment et avec son inertie. Cependant pour les bâtiments mieux isolés, l'impact énergétique et la surconsommation ont une amplitude plus petite que pour les autres bâtiments. Ainsi, même si l'effet de recouvrement est plus important pour les bâtiments plus récents, l'impact énergétique reste plus faible.

A l'opposé, les bâtiments plus anciens à cause d'une plus grande consommation de chauffage ont un impact énergétique beaucoup plus important.

Les résultats montrent aussi qu'en moyenne le chauffage reste allumé pendant 80 minutes après une coupure de deux heures.

Relativement au confort thermique, seuls les bâtiments récents permettent que la température opérative reste dans des limites définies. Cependant, pour des différences de températures élevées entre l'intérieur et l'extérieur, ces conditions de confort ne sont pas atteintes. Ainsi, malgré le grand

potentiel d'effacement des bâtiments anciens, des conditions inconfortables seront presque toujours atteintes.

On a réalisé une analyse sur le temps limite de coupure du chauffage pour déterminer le potentiel théorique maximal. Les bâtiments plus récents permettent des gains énergétiques plus importants que les bâtiments anciens. Cependant, si on compare les valeurs de la coupure de 2 heures avec une coupure soumise à une contrainte de confort, les valeurs absolues de l'impact énergétique et de la surconsommation sont jusqu'à cinq fois plus faibles.

Les résultats complets en termes énergétiques et de confort pour cette stratégie sont présentés dans l'annexe V.

4.3.2. Coupure avec condition de bande morte

Une autre stratégie identifiée dans le chapitre II est la coupure du chauffage avec condition de bande morte. Cette condition fait en sorte que l'effacement se produise seulement quand la température mesurée par la sonde de température de l'équipement atteint la température de consigne + le différentiel de température (borne haute de la « bande morte »). Ainsi on va simuler un effacement du chauffage électrique commandé par un signal qui provoque l'arrêt du chauffage électrique non pas immédiatement mais dès la fin du cycle de fonctionnement des équipements en cours. On l'illustre ci-dessous.

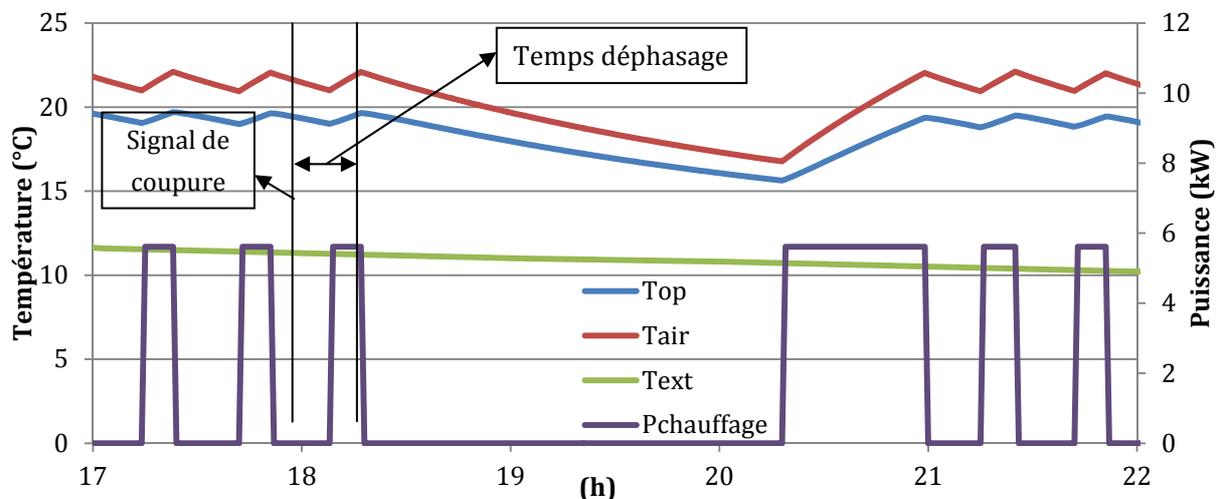


Figure 4-22 – Exemple d'application d'une coupure avec condition de bande morte

La Figure 4-22 montre un exemple où l'ordre d'effacement est envoyé à 18 heures, mais à cause de la bande morte, la coupure n'est effective que vingt minutes après le signal. Le temps de coupure reste toujours égal à deux heures, donc le contrôle finira toujours vingt minutes plus tard.

Cette stratégie a deux objectifs :

- Amélioration des conditions de confort : Température à laquelle l'effacement est réalisé est plus élevé.
- Foisonnement des coupures si la stratégie est appliquée à large échelle, évitant ainsi les pics de consommation lors de la mise en route du chauffage. Ce point sera abordé plus tard dans la section 5.3.

Dans le cas qui suit, on présente les temps de déphasage pour les différents bâtiments simulés, c'est-à-dire le temps moyen entre l'envoi du signal d'effacement par le réseau et la réalisation effective de l'effacement.

Tableau 4-10 – Temps de déphasage du à la condition de bande morte

		Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
Maison individuelle	Moyenne (min)	22,1	25,8	25,4	6,6	6,8
Appartement	Moyenne (min)	12,8	12,3	21,0	5,3	4,6

Le temps de déphasage moyen est compris entre 26 et 7 minutes pour les maisons individuelles et entre 21 et 5 pour les appartements. On observe que les bâtiments les mieux isolés ont un temps de déphasage plus petit car le différentiel statique de leur thermostats est plus petit (0.2 K), contrairement aux bâtiments anciens équipés de systèmes avec des thermostats dont le différentiel statique est plus important.

Le tableau suivant montre les temps de déphasage moyens, en prenant en compte que tous les bâtiments sont équipés de systèmes de chauffage récents, donc ayant un différentiel statique de 0,2 K.

Tableau 4-11 - Temps de déphasage du à la condition de bande morte pour de systèmes de chauffage récents

		Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
Maison individuelle	Moyenne (min)	2,7	3,6	4,3	6,6	6,8
Appartement	Moyenne (min)	4,3	5,2	5,9	5,3	4,6

Le Tableau 4-11 montre que le temps de déphasage pour les bâtiments anciens devient très faible si on utilise un système de chauffage récent.

Comme les bâtiments anciens ont plus de déperditions thermiques, la vitesse à laquelle la température va évoluer est plus importante, donc les cycles marche/arrêt deviennent plus courts. A cause de cet effet on peut observer que les temps de déphasage deviennent plus faibles pour les bâtiments anciens, que pour les bâtiments récents quand tous les bâtiments sont simulés avec le même type de thermostat (différentiel statique égal à 0,2 K).

Pour les coupures effectuées lors des jours les plus froids, les temps de déphasage peuvent atteindre des valeurs plus élevées, jusqu'à 72 minutes, car le chauffage fonctionne presque à plein régime et donc les temps des cycles marche/arrêt sont plus longs.

Nous avons également analysé la sensibilité de ce temps de déphasage à l'inertie du nœud d'air dans les logements. Nos simulations considèrent que le nœud d'air a une capacité 20 fois supérieure à la capacité de l'air. Ainsi on a considéré deux cas extrêmes pour analyser la sensibilité du temps de déphasage avec l'inertie du nœud d'air :

- 1- Pièce vide – Capacité du nœud d'air égal à $C_{air} \times 1$
- 2- Pièce très inerte - Capacité du nœud d'air égal à $C_{air} \times 40$

Le tableau suivant donne les temps de déphasage pour ces deux cas.

Tableau 4-12 – Temps de déphasage moyens pour des différentes inerties du nœud d'air

	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
Maison Individuelle - $C_{air} \times 1$	0,6	0,8	0,9	1,1	0,8
Appartement - $C_{air} \times 1$	1,2	1,2	1,2	1,0	0,9
Maison Individuelle - $C_{air} \times 40$	24,0	27,7	42,6	9,3	10,6
Appartement - $C_{air} \times 40$	41,9	45,6	53,5	11,3	12,7

Quand une pièce vide est simulée, à cause de la faible inertie du nœud d'air les cycles de marche/arrêt deviennent très rapides. Dans ce cas les temps moyens de déphasage deviennent très faibles de l'ordre d'une minute. Les temps maximaux de déphasage sont atteints pendant les jours plus doux et ils sont compris entre 2 et 4 minutes.

Les résultats de l'application de cette stratégie pour des inerties du nœud d'air deux fois plus importantes présentent des valeurs moyennes très élevés. Les temps de déphasage maximaux peuvent attendre jusqu'à 86 et 111 minutes pour les bâtiments de type maison individuelle et les bâtiments de type Appartement respectivement.

Ci-dessous on présente la sensibilité de l'inertie du nœud d'air à la valeur de référence prise dans notre étude ($C_{air} \times 20$).

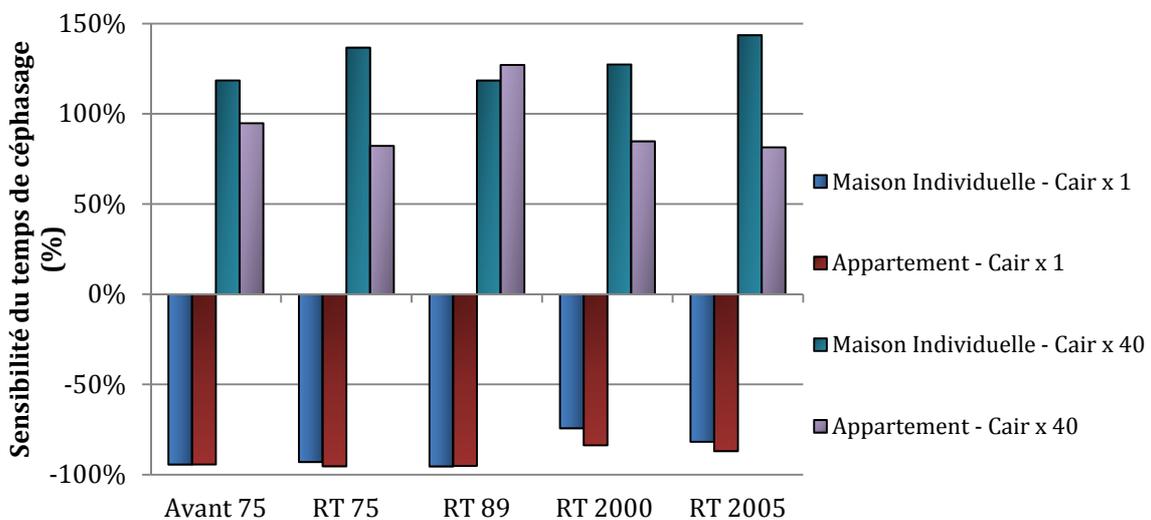


Figure 4-23 – Sensibilité du temps de déphasage à l'inertie du nœud d'air

Le temps de déphasage est très dépendant de la capacité du nœud d'air car le chauffage est contrôlé à partir de cette température. Le temps de déphasage est doublé, si on considère l'inertie du nœud d'air égale à 40 fois la capacité de l'air, car le temps de marche/arrêt est lui aussi doublé (jusqu'à 60 minutes). A l'inverse, si on considère que la pièce est vide, le temps de déphasage est réduit à plus de 90 % (réduit à 1-4 minutes).

Cette sensibilité du temps de déphasage peut s'avérer très intéressante pour l'application de l'effacement à large échelle car comme tous les bâtiments n'ont pas la même inertie, il permet un foisonnement des coupures entre les différents bâtiments.

On peut donc conclure que l'inertie de l'air va jouer un rôle très important dans l'évaluation des stratégies qui jouent sur le fonctionnement des thermostats.

On présente la différence entre effets énergétiques avec coupure + condition de bande morte et coupure simple. Les résultats en Tableau 4-11 sont exprimés en écarts relatifs moyens entre ces deux scénarios d'effacement.

Tableau 4-13- Différence des effets énergétiques entre coupure 2 heures et coupure avec condition de bande morte

		Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
Maison individuelle	<i>Modification du Recouvrement (%)</i>	-4%	-3%	-9%	-1%	0%
	<i>Modification du Impact énergétique [kWh]</i>	-15%	-16%	-26%	-6%	-6%
	<i>Modification du Surconsommation [kWh]</i>	-23%	-22%	-37%	-8%	-7%
Appartement	<i>Modification du Recouvrement (%)</i>	-4%	-10%	-12%	-1%	-1%
	<i>Modification du Impact énergétique [kWh]</i>	-26%	-30%	-32%	-8%	-8%
	<i>Modification du Surconsommation [kWh]</i>	-30%	-37%	-40%	-9%	-9%

Les effets énergétiques de cette stratégie restent plus faibles que pour la coupure sans condition d'effacement. On observe une réduction de l'impact énergétique car l'impact énergétique est mesuré à partir du moment où le signal est envoyé (18 heures). Comme on l'a vu précédemment cette stratégie va provoquer un déphasage de la coupure et ainsi de l'énergie sera encore consommée pendant quelques minutes après le signal de coupure.

On vérifie aussi une réduction de la surconsommation, car comme la coupure est faite à partir d'une température plus élevée, la température à la fin des deux heures de coupure sera plus élevée que dans le cas d'une coupure simple.

Ces effets sont plus visibles dans les bâtiments anciens à cause du différentiel statique (« bande morte ») plus grand (2 K).

La température de l'air au début de la coupure est plus élevée que dans le cas des coupures sans condition d'effacement. De fait, il y a donc une amélioration des conditions de confort pendant l'effacement avec cette stratégie. Dans le Tableau 4-14 on présente les modifications moyennes en termes de temps hors confort et de degrés-heures d'inconfort par rapport à la coupure simple.

Tableau 4-14 - Amélioration du confort entre la coupure sans et avec condition d'effacement

		Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
Maison individuelle	<i>Temps hors confort</i>	-1,6%	-5,2%	-7,2%	-2,1%	-2,8%
	<i>DH</i>	-4,8%	-8,7%	-12,2%	-3,3%	-4,1%
Appartement	<i>Temps hors confort</i>	-12,5%	-14,5%	-19,6%	-4,2%	-7,5%
	<i>DH</i>	-18,4%	-19,3%	-22,7%	-4,9%	-8,7%

Le Tableau 4-14 montre que des améliorations sont obtenues spécialement pour les bâtiments anciens de type « Appartement ». Ces améliorations peuvent atteindre 20 % temps hors confort et 23 % en degrés-heures d'inconfort. Pour les bâtiments plus récents, les améliorations sont plus faibles de l'ordre de 2-4 % pour les maisons individuelles et 4 à 9 % pour les appartements.

Malgré ces améliorations les temps hors confort restent élevés même avec cette stratégie : de sorte que pour la stratégie d'effacement sans condition de bande morte, seuls les bâtiments récents de type appartement peuvent être considérés comme confortables pendant les coupures (temps hors confort < 42 minutes).

4.3.2.1. Discussion - Coupure avec condition de bande morte

La coupure avec condition de bande morte donne donc des valeurs pour l'impact énergétique et la surconsommation réduits par rapport à la coupure simple.

Le temps de déphasage est sensible à deux facteurs : l'inertie du nœud d'air et le différentiel statique du thermostat.

L'inertie du nœud d'air et du bâtiment va jouer un rôle très important. A partir des résultats on a pu constater qu'un bâtiment plus inerte des cycles de marche/arrêt plus longs et donc des temps de déphasage plus longs. En conséquence, en matière de « produit » d'effacement, on ne contrôle pas le début de l'effacement.

Si au début de la coupure on s'assure d'être à la température d'air à la valeur la plus élevée, cette stratégie permet une amélioration entre 5 et 26 % du temps hors confort. Malgré ces améliorations, cette stratégie conduit tout même à conditions inconfortables.

Les résultats complets en termes énergétiques et de confort de cette stratégie sont présentés dans l'annexe V.

4.3.3. Coupure avec arrêt de la ventilation mécanique

Une autre stratégie identifiée au chapitre II est la coupure du chauffage électrique avec arrêt de la ventilation mécanique (si celle-ci existe). Pendant la coupure, on arrête la ventilation, et donc on limite les pertes de chaleur par renouvellement d'air pendant la coupure. Toutefois, l'arrêt de la ventilation ne veut pas dire qu'aucun échange aéraulique ne se produit, car avec même avec l'arrêt de la ventilation mécanique, des infiltrations d'air persistent par les fenêtres et parois. Ainsi dans nos

simulations on considère toujours, un débit d'air d'une valeur de 0.3 vol/h correspondant aux infiltrations pendant la coupure.

On simule donc un effacement du chauffage électrique consistant en l'arrêt simultané pendant deux heures des équipements de chauffage et ventilation.

Sachant que les pertes de chaleur sont plus faibles pendant la coupure, la température doit descendre plus doucement. La figure suivante montre la vitesse à laquelle la température opérative chute pendant une coupure pour un effacement avec et sans arrêt de la ventilation.

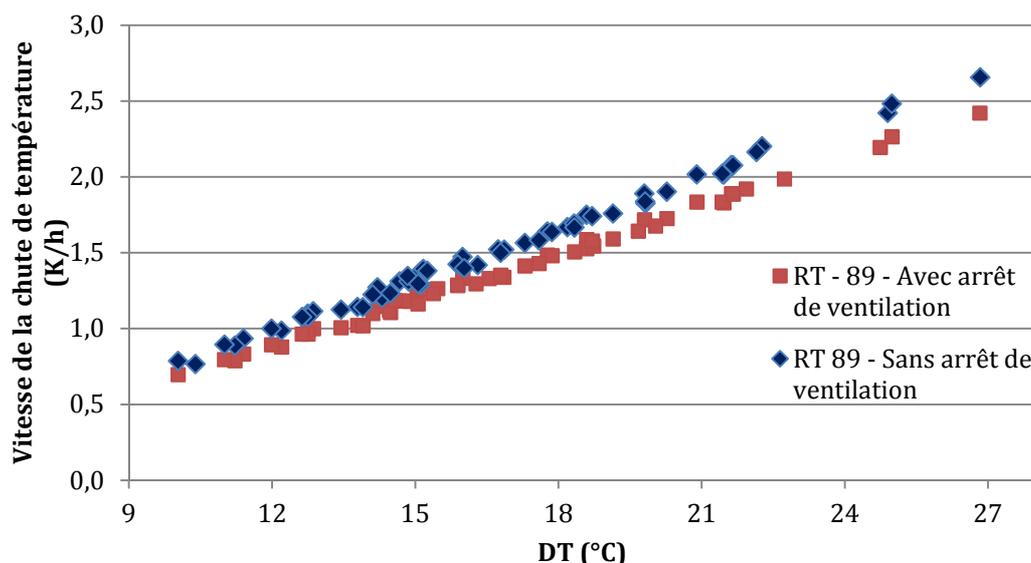


Figure 4-24 – Vitesse de la chute de température pour une coupure avec et sans arrêt de la ventilation

La Figure 4-24 montre que la vitesse à laquelle la température opérative chute est moins importante pour une coupure sans ventilation que pour une coupure avec ventilation. On peut donc en déduire que le confort sera amélioré. Le tableau suivant quantifie cette amélioration du confort par application de cette stratégie.

Tableau 4-15 – Amélioration moyenne du confort par l'arrêt de la ventilation pendant la coupure

		Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
Maison individuelle	Temps hors confort	0,4%	2,5%	4,2%	7,8%	9,8%
	DH	3,7%	7,0%	9,9%	15,2%	17,5%
Appartement	Temps hors confort	10,1%	15,3%	21,4%	28,4%	33,5%
	DH	17,0%	24,0%	29,6%	38,7%	43,8%

Pour les bâtiments anciens (jusqu'à RT – 89) du type maison individuelle, les gains en termes de confort restent faibles. Les gains sur les appartements deviennent plus importants que pour les maisons individuelles, car les pertes de chaleur par ventilation ont un impact plus important dans l'évolution de la température que les pertes par les parois dans les appartements.

Pour les bâtiments de type appartement, les améliorations des critères de confort (temps hors confort et degrés-heures d'inconfort) peuvent aller de 10 à 44 %, tandis que pour les maisons individuelles, ces améliorations vont de 0,4 jusqu'à 17,5 %.

Tableau 4-16 – Temps hors confort avec arrêt de la ventilation pendant la coupure

Temps hors confort (min)	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
<i>Maison Individuelle</i>	373	188	158	117	100
<i>Appartement</i>	83	69	49	26	19

Ainsi, les maisons individuelles présentent des conditions plus inconfortables que les appartements. Même avec l'arrêt de la ventilation pendant la coupure (Tableau 4-16), le problème de l'inconfort thermique persiste principalement pour les bâtiments type maison individuelle, car les temps hors confort restent élevés (Tableau 4-16).

Dans nos études, on fait l'hypothèse que l'arrêt de la ventilation pour une période de temps courte (1-2 heures) n'entraîne pas de problème de qualité d'air. Cependant, pour des coupures plus longues, des modèles de qualité d'air doivent être couplés aux simulations pour déterminer la concentration des différents polluants dans la pièce.

Dans cette stratégie, on considère que la coupure du système de chauffage + ventilation se fait simultanément après avoir reçu un signal d'effacement. Dans la simulation de référence (simulation sans coupure), la ventilation reste allumée, car ce bâtiment n'a pas reçu le signal d'effacement.

Ainsi l'impact énergétique reste le même que dans une coupure sans arrêt de la ventilation (coupure simple). Mais étant donné que les pertes de chaleur sont moins importantes (dans la simulation avec coupure), les valeurs de surconsommation et de recouvrement sont différentes comme l'indique le tableau suivant.

Tableau 4-17 – Modification de la surconsommation et du recouvrement entre la coupure avec et sans arrêt de la ventilation

		Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
Maison Individuelle	<i>Modification de la Surconsommation</i>	-3%	-4%	-3%	-6%	-6%
	<i>Modification du Recouvrement</i>	-3%	-4%	-3%	-7%	-7%
Appartement	<i>Modification de la Surconsommation</i>	-7%	-9%	-12%	-12%	-13%
	<i>Modification du Recouvrement</i>	-8%	-9%	-13%	-12%	-14%

Le Tableau 4-17 montre ainsi que des réductions faibles de surconsommation et de recouvrement sont atteintes avec ce type de stratégie de contrôle par rapport à une stratégie de coupure simple. Les réductions pour les bâtiments de type appartement sont plus importantes et peuvent atteindre 13% pour la surconsommation et 14% pour l'effet de recouvrement.

4.3.3.1. Discussion - Coupure avec arrêt de la ventilation mécanique

La coupure du chauffage électrique simultanée avec l'arrêt de la ventilation mécanique permet de réduire les pertes de chaleur pendant la coupure. De ce fait, des améliorations sur le confort sont

obtenues principalement pour les bâtiments de type appartement. Cependant, les temps hors confort restent élevés, sauf pour les appartements récents.

Cette stratégie permet aussi une réduction de l'effet de recouvrement et de surconsommation d'environ 3 à 7 % pour les maisons individuelles et entre 7 et 14 % pour les Appartements, par rapport à une simulation sans arrêt de ventilation.

Les résultats complets en termes énergétiques et de confort pour cette stratégie sont présentés dans l'annexe V.

4.3.4. Coupure avec préchauffage

Une solution possible pour éviter des coupures inconfortables passe par le préchauffage du bâtiment avant la coupure des équipements de chauffage. Avec ce préchauffage, on augmente la température et on « charge » le bâtiment en chaleur en utilisant son inertie du bâtiment. On illustre cette stratégie ci-dessous.

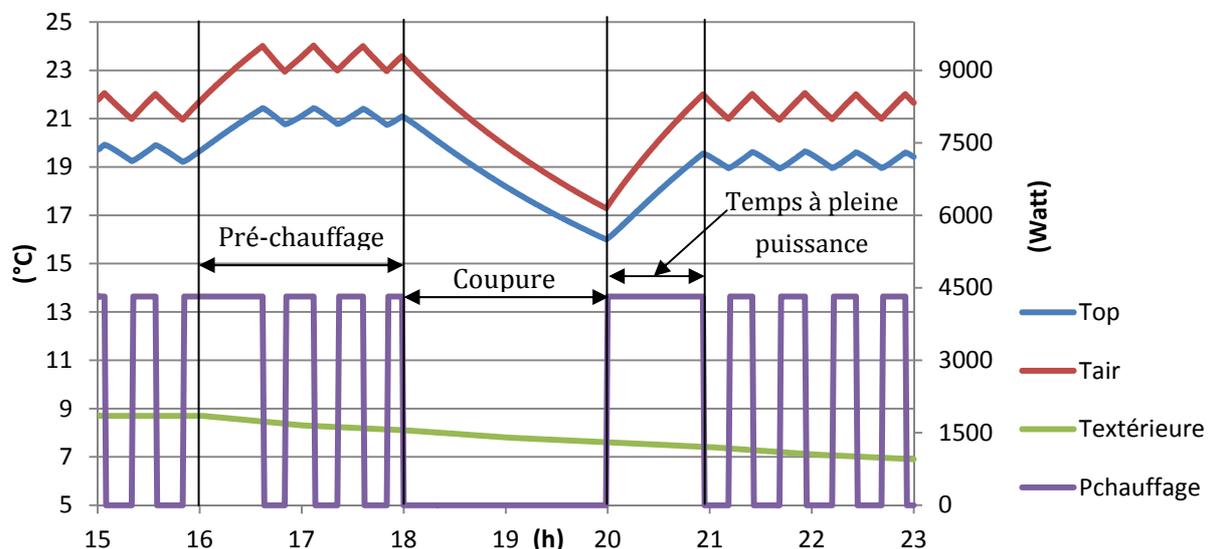


Figure 4-25 - Exemple d'application d'une coupure avec préchauffage - Maison individuelle RT 75

La Figure 4-25 présente cette stratégie d'effacement qui se compose d'une période de préchauffage de 2 heures, suivie d'une coupure des équipements de chauffage pendant 2 heures également. Pendant la période de préchauffage, la consigne de température est augmentée de 2°C. Le préchauffage va permettre de chauffer le bâtiment jusqu'à une température d'air de 23.5 °C avant la coupure. Cette stratégie va ainsi permettre une amélioration du confort lors de la coupure du chauffage en retardant le moment où le bâtiment atteint la limite inférieure de la zone de confort mais va provoquer nécessairement une consommation de chauffage plus élevée que dans le cas de la coupure simple du chauffage électrique.

Pour cette stratégie de contrôle, la surconsommation est calculée en prenant en compte la période de préchauffage et la période après la coupure.

Le Tableau 4-18 montre les différences en termes de recouvrement et de surconsommation par rapport à une coupure sans préchauffage.

Tableau 4-18 – Augmentations moyennes de l'effet de recouvrement et de surconsommation pour la coupure avec préchauffage par rapport à la coupure simple

		Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
Maison individuelle	<i>Recouvrement</i>	52%	50%	49%	47%	45%
	<i>Surconsommation</i>	51%	49%	47%	44%	42%
Appartement	<i>Recouvrement</i>	47%	30%	35%	41%	40%
	<i>Surconsommation</i>	43%	29%	34%	38%	37%

On observe une augmentation entre 29 et 51 % en termes de surconsommation et une augmentation entre 30 et 51 % pour l'effet de recouvrement.

Dû au préchauffage, l'effet de recouvrement dépasse ou reste très proche de 100 % pour toutes les périodes de construction. C'est-à-dire qu'avec l'application de cette stratégie, on va consommer plus au total, que dans la situation de référence (dans laquelle il n'y a ni coupure ni préchauffage).

Cependant, à cause de ce préchauffage le confort sera amélioré pendant la coupure. Le tableau suivant montre le temps moyen hors confort pour l'application de cette stratégie et pour la coupure simple.

Tableau 4-19 – Temps hors confort pour une coupure avec 2h de préchauffage et pour la coupure simple

Temps moyen hors confort (min)		Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
Coupure avec préchauffage / Coupure simple	Maison individuelle	349/374	154/193	111/165	70/127	53/110
	Appartement	41/92	31/80	21/62	7/36	4/28

L'amélioration du confort est grande pour les bâtiments de type appartement où le temps hors confort reste faible. Pour les maisons individuelles, la diminution du temps hors confort est plus visible pour les bâtiments récents que pour ceux qui ont été construites avant 75 le temps hors confort reste presque identique au cas de la coupure sans préchauffage.

La figure suivante montre le temps à pleine puissance du à l'augmentation de la consigne pendant le préchauffage.

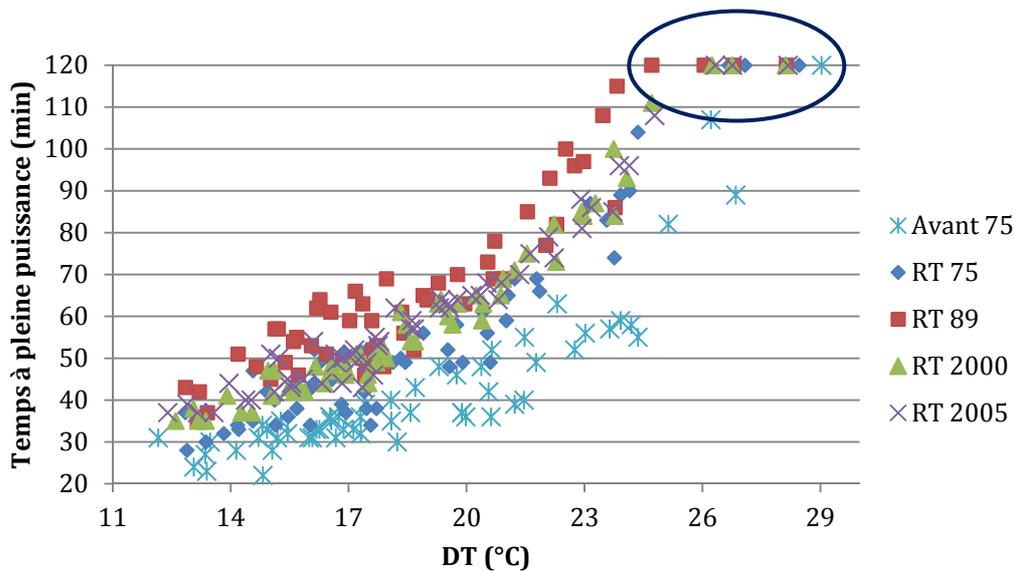


Figure 4-26 – Temps à pleine puissance pendant le préchauffage – Maison individuelle

Pour des différences de température (DT) élevées, le temps à pleine puissance, pendant le préchauffage, atteint la même valeur que le temps du préchauffage (120 minutes). A cause des différences de température élevées le chauffage fonctionne déjà à un niveau proche de la pleine puissance donc l'augmentation de la consigne n'a que peu d'impact sur le fonctionnement de l'équipement. La figure suivante montre la température opérative avant la coupure (avec préchauffage) pour des différences de températures élevées.

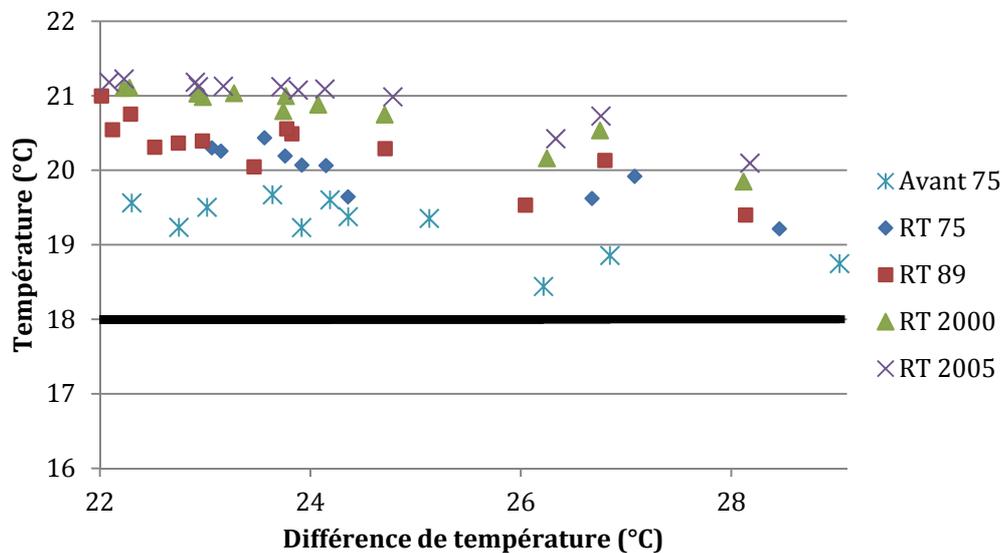


Figure 4-27 – Température opérative avant la coupure avec préchauffage (DT élevées) – Maison individuelle

La Figure 4-27 montre que pour des différences de température élevées, même avec le préchauffage, la température opérative avant la coupure reste faible et proche de 18°C. Cette particularité est plus observable pour les maisons individuelles construites avant 75. Ainsi, les valeurs du temps hors confort pour ces températures restent identiques aux valeurs de la coupure sans préchauffage.

Tableau 4-20 – Différence du temps hors confort max entre une coupure avec et sans préchauffage

Variation du temps hors confort max	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
Maison individuelle	-1%	-2%	-8%	-14%	-17%
Appartement	-18%	-18%	-16%	-36%	-45%

Le Tableau 4-20 montre que les valeurs maximales du temps hors confort sont réduites seulement de 1 à 8 % pour les bâtiments anciens (construits avant 75 et jusqu'à RT 89). Pour les maisons individuelles, le préchauffage aura un impact très faible sur le confort, car le fonctionnement lors des coupures est proche du plein régime.

Pour les appartements, la réduction de l'inconfort reste élevée, principalement pour les bâtiments récents.

Malgré les améliorations de confort dues au préchauffage, comme pour la coupure simple, la vitesse moyenne à laquelle la température opérative descend reste supérieure à 2 K/h pour des DT supérieures à 18°C.

On a aussi étudié l'influence du temps de préchauffage sur les effets énergétiques et l'influence sur le confort. Cette influence est représentée dans les deux figures suivantes.

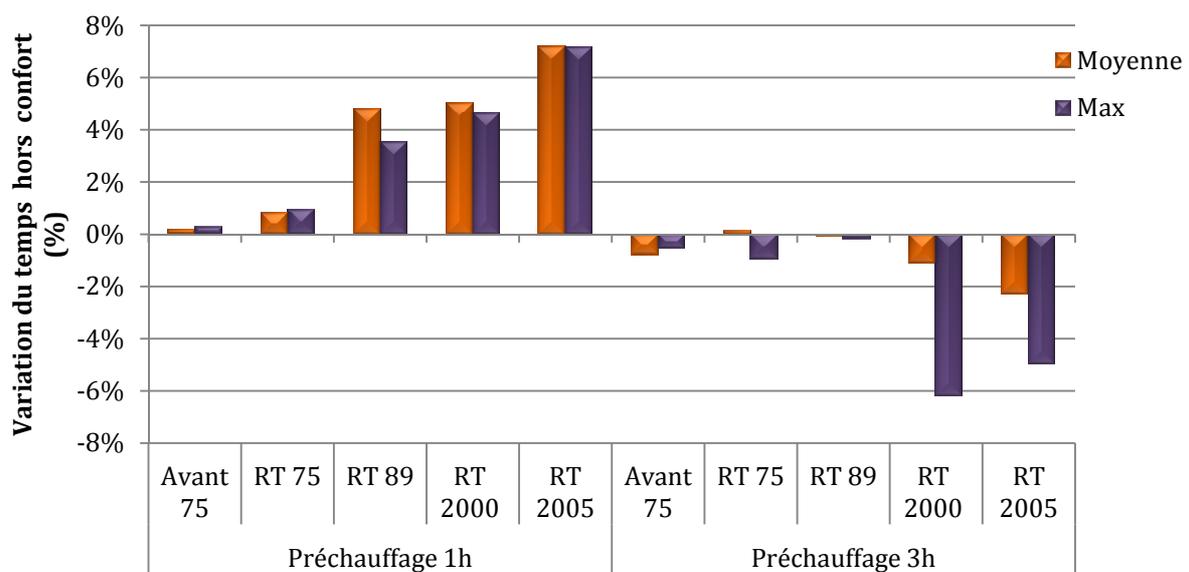


Figure 4-28 – Influence du temps de préchauffage sur le temps hors confort – Maison individuelle

La Figure 4-28 montre l'influence du pas de temps de préchauffage sur le temps hors confort. Pour des temps de préchauffage plus courts, on s'aperçoit que le temps hors confort augmente en fonction de la période de construction. Cependant, l'influence du temps de préchauffage sur l'inconfort d'une stratégie de coupure reste très petite pour les bâtiments anciens.

L'augmentation du temps de préchauffage n'aura presque aucun impact sur le temps hors confort moyen. Toutefois, pendant les jours les plus froids (valeurs « max ») comme le temps de préchauffage est plus grand, la température de la pièce sera plus élevée au début de la coupure et donc le temps hors confort sera réduit.

L'influence du temps de préchauffage sur les effets énergétiques est présentée dans la Figure 4-29.

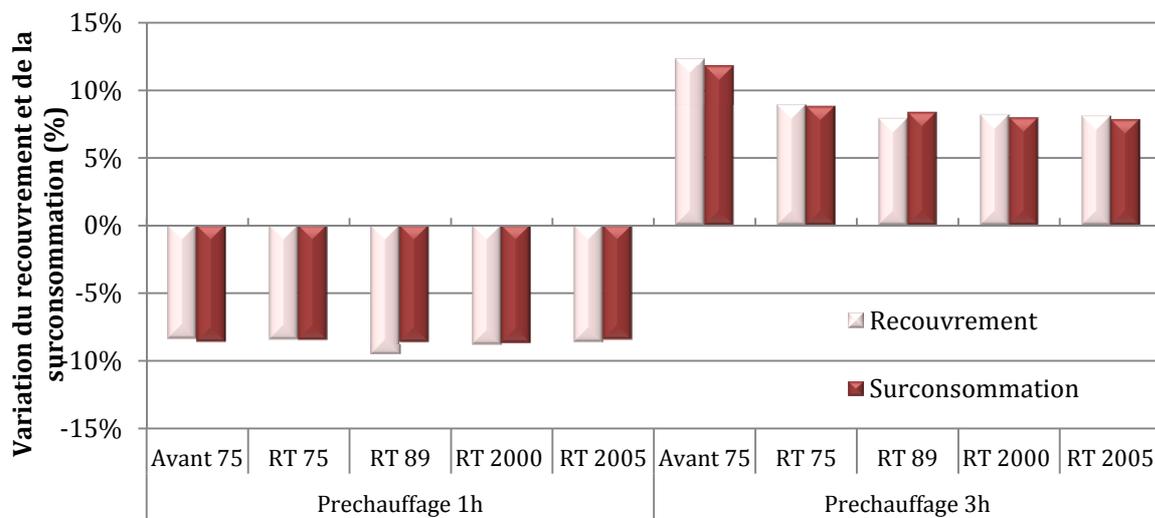


Figure 4-29 – Influence du temps de préchauffage sur le recouvrement et surconsommation – Maison Individuelle

Une réduction d'environ 8 % est observée pour toutes les périodes de construction, si on réalise un préchauffage de seulement d'une heure.

Avec l'augmentation du temps de préchauffage, le recouvrement et la surconsommation augmenteront de 8 % en moyenne, sauf pour les bâtiments construits avant 75, où cette augmentation atteint les 12 %.

4.3.4.1. Discussion- Coupure avec préchauffage

Cette stratégie peut devenir intéressante pour le réseau en termes de « valley-filling ». Dans le cas concret du réseau français, on peut imaginer que le préchauffage permettra de combler le creux existant, dans la courbe de charge électrique française, entre 16 et 18 heures et la coupure du chauffage permettra de réduire le pic de consommation vers 19 heures.

La coupure avec préchauffage permet de réduire l'inconfort thermique pendant la coupure, en termes de temps hors confort. Cependant, pour les maisons individuelles anciennes, le temps hors confort reste très grand entre 111 et 354 minutes selon la période de construction. Pour des différences de température (DT) élevées, le chauffage fonctionne près du plein régime, donc l'augmentation de la consigne, lors du préchauffage, a des conséquences faibles sur le mode de fonctionnement. A cause de la saturation du chauffage pour des différences de température élevées, les réductions de l'inconfort restent négligeables pour les maisons individuelles.

Ainsi, on peut déduire que le préchauffage est plus intéressant en termes d'amélioration de confort pour les bâtiments de type appartement (plus inertes) et pour les jours où la différence de température n'est pas proche des conditions de dimensionnement.

Cette stratégie entraîne des consommations supérieures à la coupure simple (sans préchauffage) car il y a une période de surconsommation pendant le préchauffage.

On a aussi réalisé une étude sur la sensibilité sur le temps hors confort et sur les effets énergétiques en fonction du temps de préchauffage.

La réduction du temps de préchauffage entraîne une augmentation faible du temps hors confort, spécialement pour les bâtiments anciens. Avec un temps de préchauffage de 3 heures, l'amélioration du confort reste faible.

Pour un temps de préchauffage d'une heure, l'effet de recouvrement et la surconsommation sont réduits d'environ 8%. Pour de temps de préchauffage de trois heures, l'effet inverse est observé.

Les résultats complets en termes énergétiques et de confort pour cette stratégie sont présentés dans l'annexe V.

4.3.5. Passage en mode-éco

La dernière stratégie de contrôle identifiée dans le chapitre II a été la réduction de consigne pendant la période de contrôle de 2 K. On l'illustre ci-dessous.

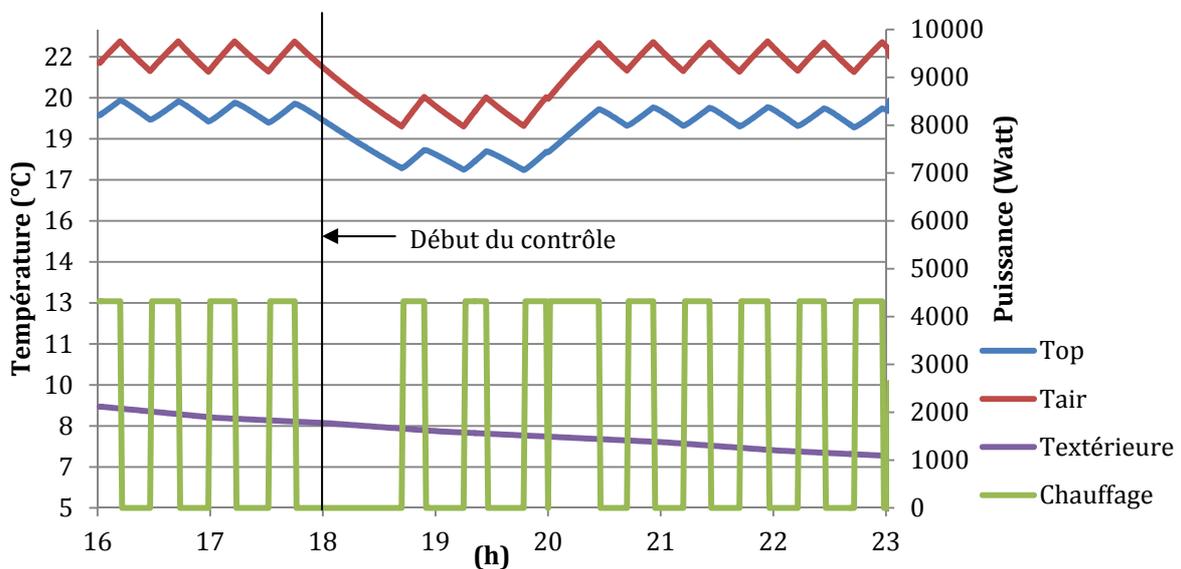


Figure 4-30 - Exemple d'application de passage en mode ECO pendant 2 heures - Maison Individuelle RT 75

La stratégie de passage en mode-éco correspond à une réduction de la consigne de température de 2 K pendant les heures de contrôle (dans notre cas 2 heures). Par rapport à la simple coupure du chauffage électrique, cette stratégie de contrôle a comme objectif la réduction de l'inconfort en gardant une température constante, mais plus basse que la simulation de référence (consigne égale à 21.5 °C).

Dans le tableau suivant, on observe les différences entre le passage en mode-éco et la coupure simple du chauffage électrique.

Tableau 4-21 –Variation des effets énergétique du passage en mode-éco et de la coupure simple

		Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
Maison individuelle	Variation du Recouvrement (%)	7%	-1%	6%	2%	4%
	Variation de l'Impact énergétique (%)	-69%	-64%	-57%	-53%	-50%
	Variation de la Surconsommation (%)	-66%	-63%	-54%	-51%	-48%
Appartement	Variation du Recouvrement (%)	5%	-3%	-4%	2%	3%
	Variation de l'Impact énergétique (%)	-50%	-47%	-37%	-31%	-27%
	Variation de la Surconsommation (%)	-48%	-47%	-39%	-29%	-25%

L'effet de recouvrement reste presque inchangé pour tous les bâtiments, avec des différences de -1 jusqu'à 7 %.

Avec l'application du passage en mode-éco, on va avoir un impact énergétique beaucoup plus faible car le chauffage va fonctionner pendant la période de contrôle pour assurer une température opérative acceptable en termes de confort. Cette stratégie de contrôle a ainsi un impact énergétique plus faible, de l'ordre de 50 à 69 % pour les maisons individuelles et de 27 à 50 % pour les appartements par rapport à la coupure simple du chauffage. La surconsommation présente également réduction significative du même ordre que l'impact énergétique.

En valeur absolue cette stratégie permet ainsi un impact énergétique d'environ parmi 1,5 kWh pour tous les bâtiments.

Par rapport à l'amélioration du confort pendant l'application de la stratégie, les résultats sont présentés ci-dessous.

Tableau 4-22 – Variation du Temps hors confort et des Degrés-heures d'inconfort de la stratégie passage en mode-éco par rapport à la coupure simple

		Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
Maison individuelle	Variation du Temps hors confort	-9%	-32%	-46%	-62%	-67%
	Variation des DH	-64%	-81%	-85%	-91%	-93%
Appartement	Variation du Temps hors confort	-77%	-86%	-82%	-97%	-99%
	Variation des DH	-96%	-98%	-97%	-100%	-100%

Le temps hors confort pour les maisons individuelles anciennes reste élevé mais les degrés-heures d'inconfort ont été réduits de 64 à 93 % par rapport à la coupure simple. C'est-à-dire que le temps hors confort reste élevé, mais l'écart de la température de la pièce par rapport à la limite basse de la zone de confort (18°C) est plus faible que pour la coupure simple.

Dans le cas des appartements, des conditions confortables sont en moyenne maintenues pour toutes les périodes de construction.

Seules les maisons individuelles construites à partir de 2005 ont des temps hors confort inférieures à 42 minutes (temps hors la plage de confort maximal par jour).

De la même manière que pour la coupure simple, le bâtiment peut se trouver dans des conditions inconfortables avant même de l'application de la stratégie de contrôle.

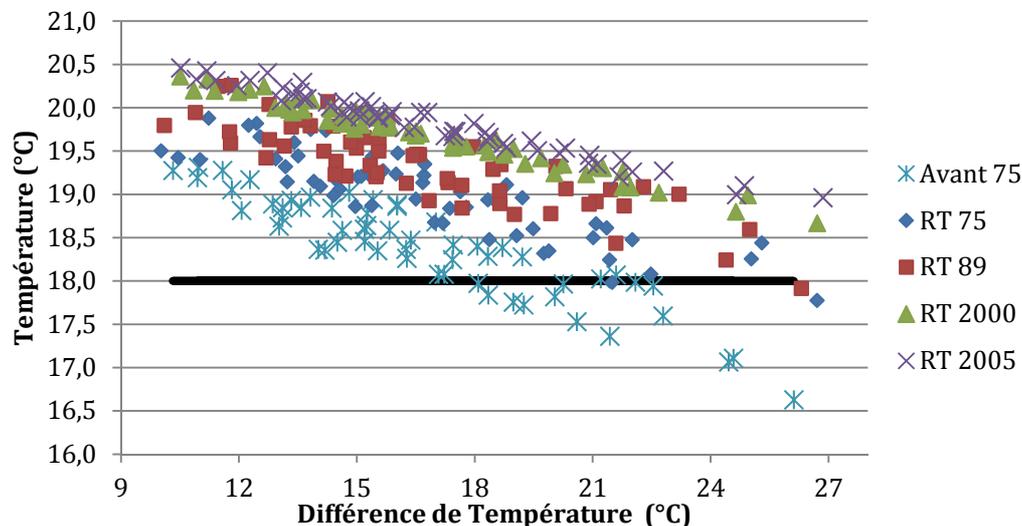


Figure 4-31 – Température opérative dans la pièce lors de l'application du contrôle – Maison Individuelle

En effet, lors des jours très froids, le bâtiment présente déjà une température opérative $< 18\text{ °C}$ ce qui explique ces périodes où les conditions sont en-dehors des zones de confort. Ainsi lorsque la consigne est réduite, la température de la pièce reste inconfortable ou le devient davantage.

Cependant, la vitesse à laquelle la température change dans la pièce, reste toujours inférieur à 2 K/h , donc les conditions de confort décrites dans les normes de confort restent valides.

4.3.5.1. Discussion – Passage en mode-éco pendant le contrôle

Avec l'application de cette stratégie, les impacts énergétiques sont réduits de 48 à 69 % pour les maisons individuelles par rapport à la simple coupure du chauffage. Pour les bâtiments de type appartement, cette réduction reste comprise entre 25 et 50 % tandis que l'effet de recouvrement est du même ordre de grandeur que la coupure simple.

Des améliorations non négligeables en termes de confort thermique sont atteintes avec cette stratégie. Cette réduction de l'inconfort est plus visible en termes de degrés-heures d'inconfort, car même si on reste hors de la zone de confort, la consigne réduite permet que l'écart entre la température de la pièce et la température limite de la zone de confort reste faible.

Les vitesses à laquelle la température change dans pièce restent inférieures à 2 K/h . Ainsi, les conditions de confort décrites dans les normes de confort sont respectées.

Les résultats complets en termes énergétiques et de confort pour cette stratégie sont présentés dans l'annexe V.

4.3.6. Analyse de sensibilité sur les variables de calcul du bâtiment

Pour pouvoir quantifier l'impact de chaque paramètre dans nos simulations, on a effectué une étude de sensibilité sur ces différents paramètres (Tableau 4-23). Cette étude permettra de comprendre

comment les différents paramètres affectent les effets énergétiques dus à l'application des stratégies de contrôle.

Une question très importante est la sensibilité du temps de coupure sans affecter le confort à ces paramètres, car cette analyse permettra d'identifier les caractéristiques plus importantes des bâtiments pour l'effacement. Ainsi, on a également réalisé une étude de sensibilité sur le temps de coupure sans inconfort.

Le tableau suivant montre les paramètres testés et les valeurs utilisées dans l'analyse de sensibilité.

Tableau 4-23 – Plage des valeurs utilisées dans l'étude de sensibilité

h_{int} [W/m².K]	1,5 - 8
Orientation du bâtiment	Sud
Isolation extérieure	-
Capacité du nœud d'air	1 - 40 x C _{air}
Epaisseur des parois internes [m]	0,05 - 0,15
Epaisseur parois externes (couche béton) [m]	0,1 - 0,3
Débit de ventilation [Vol/h]	0,3 - 0,9
Puissance du chauffage	80% - 120%
Panneau radiant	-
Gains internes [W/m²]	5,75 - 17,25
Surface fenêtre	50% - 150%

Les valeurs du coefficient de convection intérieur ont été choisies en se basant sur les valeurs minimales et maximales utilisés dans la littérature.

Dans nos simulations, l'orientation de la paroi extérieure a été vers le nord pour simuler le cas sans apport solaires (rayonnement traversant la fenêtre). Ici, on évalue l'influence de l'orientation en choisissant une orientation vers le sud où les apports solaires seront maximums.

La capacité du nœud d'air a été choisie de façon à représenter une pièce vide (sans inertie des meubles) et une pièce correspondant aux valeurs maximales trouvées dans la littérature.

Nous avons voulu évaluer l'impact de l'utilisation d'un panneau rayonnant par rapport à un système purement convectif.

Toutes les valeurs des autres paramètres ont été choisies en faisant varier la valeur de référence de plus ou moins 50 %.

Pour évaluer les effets énergétiques dus au changement de ces paramètres, on a réalisé une coupure du chauffage électrique pendant deux heures pour une maison individuelle.

Dans les figures suivantes, on présente la sensibilité des différents paramètres. Les valeurs positives indiquent une augmentation de l'indicateur en analyse et les valeurs négatives indiquent une réduction. Pour chaque paramètre analysé, on présente aussi les valeurs pour les différentes périodes de construction. La figure suivante montre la sensibilité de l'impact énergétique aux différents paramètres.

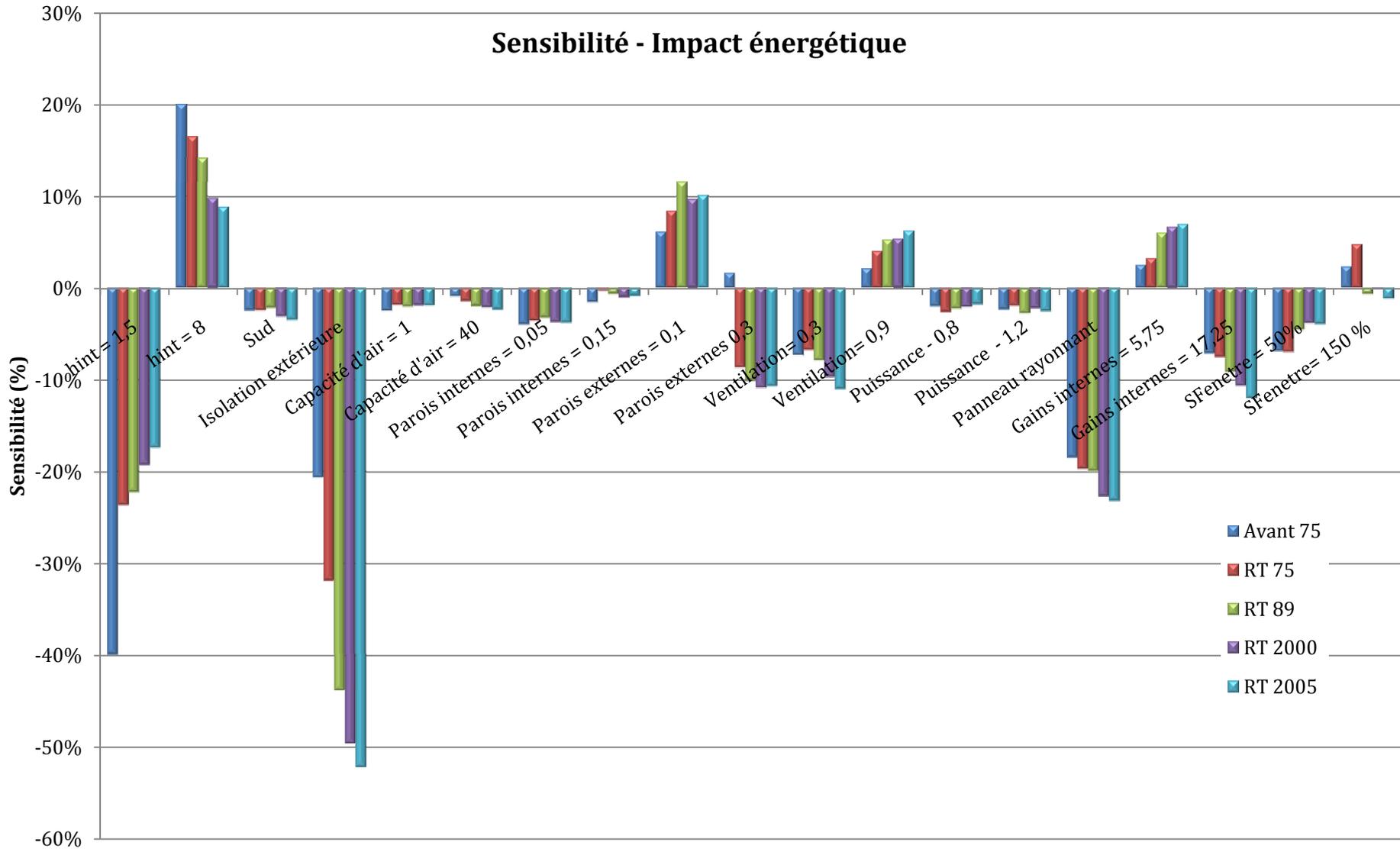


Figure 4-32 – Sensibilité de l'impact énergétique aux différents paramètres

La Figure 4-32 montre que les paramètres qui font baisser le plus l'impact énergétique sont :

- Un faible coefficient d'échange convectif intérieur (h_{int})
- L'isolation par l'extérieur
- L'utilisation d'un panneau rayonnant
- L'utilisation d'un faible débit de ventilation

Nous les reprenons ci-dessous :

- Un faible « h_{int} » réduit le transfert de chaleur des parois vers le nœud d'air, limitant ainsi les pertes de chaleur de l'air par convection mais aussi le taux de chargement, en chaleur, des murs.
- L'impact énergétique est aussi influencé par le positionnement de l'isolation. Quand l'isolation des parois verticales se fait par l'extérieur, on a plus d'inertie dans le bâtiment ce qui décale la consommation. Dans notre cas d'étude, l'isolation extérieure va réduire l'impact énergétique de 20 à 50 % en moyenne, en fonction de la période de construction.
- Comme le panneau rayonnant émet de la chaleur par radiation vers les parois, cette chaleur est absorbée par les murs et par conséquent intensifie l'effet de l'inertie des murs en stockant davantage de chaleur dans les murs.
- Un plus faible débit de ventilation permet d'avoir moins de pertes par renouvellement d'air et ainsi une consommation plus faible pendant la coupure.
- L'utilisation de fenêtres plus petites aura comme effet une réduction d'environ 5 % de l'impact énergétique. Les autres paramètres n'ont pas une sensibilité significative avec moins de 5 % de variation sur l'impact énergétique.

Nous avons aussi étudié la sensibilité des différents paramètres sur la surconsommation. La figure suivante montre la sensibilité de la surconsommation à ces mêmes paramètres.

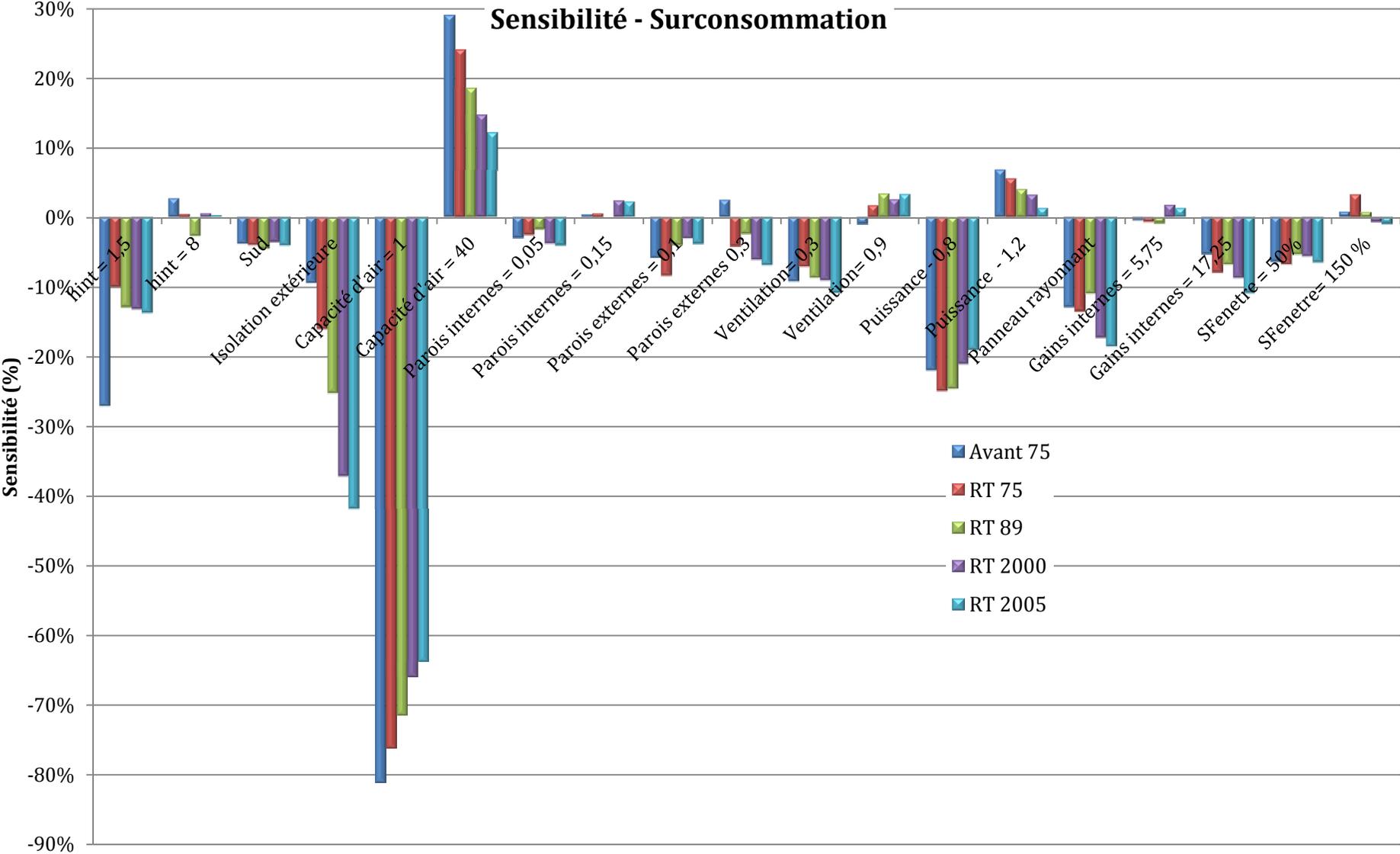


Figure 4-33 – Sensibilité de la surconsommation aux différents paramètres

Les paramètres qui auront le plus d'impact sur la surconsommation sont :

- La capacité de l'air
- Le dimensionnement de la puissance du chauffage
- L'utilisation d'un panneau rayonnant
- Débit d'air de Ventilation

Nous les reprenons ci-dessous :

- Si la simulation est réalisée pour une pièce vide ($C_{air} = 1$), la surconsommation est réduite jusqu'à 80 %. Comme on a moins d'inertie dans le nœud d'air, le chauffage va faire remonter la température plus facilement jusqu'à la température de consigne.
- La puissance de dimensionnement du chauffage aura aussi un impact important sur la surconsommation car avec le manque de puissance, le chauffage aura plus de difficulté à faire remonter la température. De plus, pour des puissances de dimensionnement faibles, le chauffage va fonctionner presque à plein régime pendant les jours très froids car la température de consigne n'est pas atteinte.
- Le panneau rayonnant permettra de stocker plus de chaleur dans les parois et ainsi de réduire la surconsommation jusqu'à 15%.
- Pour des coefficients d'échange convectif élevés, l'altération de la surconsommation reste très petite, au contraire de l'impact énergétique.
- Relativement aux gains internes, ceux-ci vont apporter de la chaleur à l'air permettant de compenser les pertes de chaleur dues à la coupure. Ainsi, une augmentation de 6 W/m^2 permettra dans notre cas une réduction d'environ 8 % de la surconsommation.
- Des fenêtres plus petites auront comme effet la réduction des pertes de chaleur sur le nœud d'air. Après la coupure, l'air va perdre une quantité de chaleur moins importante que dans le cas de référence. Ainsi, la surconsommation sera réduite de 6 % pour des bâtiments ayant des fenêtres plus petites.

On a analysé aussi le temps à pleine puissance après la coupure pour les différents paramètres. La figure suivante montre cette sensibilité du temps à pleine puissance à la variation des différents paramètres.

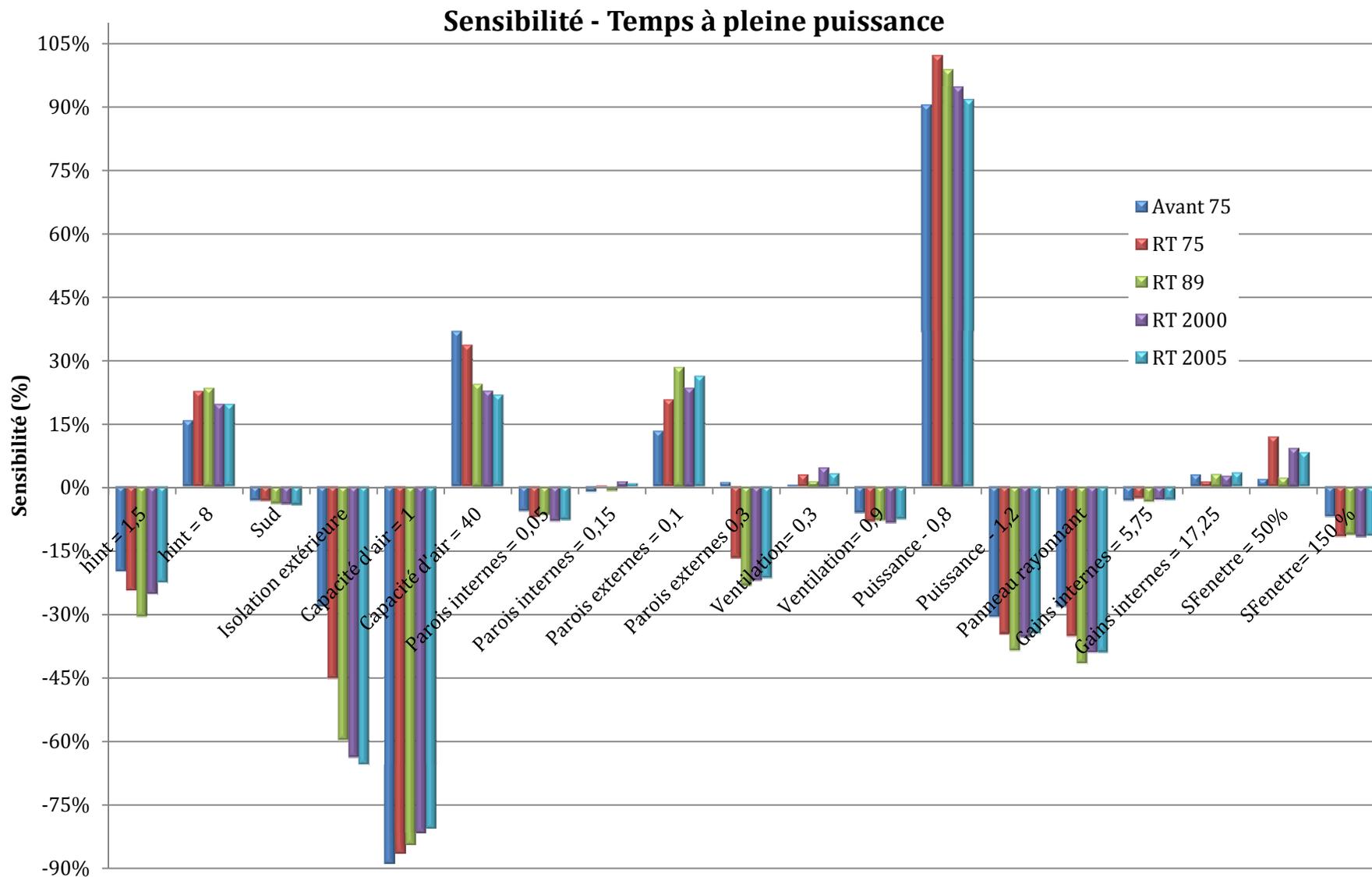


Figure 4-34 – Sensibilité du temps à pleine puissance aux différents paramètres

Le temps à pleine puissance est influencé principalement par la puissance de chauffage. Une réduction de 20% de la puissance de dimensionnement va doubler le temps de coupure.

Pour une pièce vide, le temps à pleine puissance est réduit de 80% car à cause de la faible inertie, le chauffage peut remonter la température de la pièce jusqu'à la température de consigne plus rapidement.

L'isolation par l'extérieur des parois a un impact très grand car avec une inertie supérieure, par rapport au cas de référence (isolation intérieure), des réductions jusqu'à 60% du temps de fonctionnement à pleine puissance sont atteintes.

Si l'épaisseur de la couche de béton des parois externes est augmentée, une réduction de 20 % en moyenne du temps à pleine puissance.

Comme on l'a vu auparavant, un faible coefficient h_{int} réduit les échanges de chaleur entre l'air et les parois. Après la coupure, le chauffage fait remonter plus vite la température quand cet échange est faible. Avec $h_{int}=1.5$ ($W/m^2.K$), une réduction d'environ 20 % est atteinte.

L'utilisation d'un panneau rayonnant, au lieu d'un convecteur électrique, permettra une réduction d'environ 40 % du temps à pleine puissance.

L'impact des autres paramètres sur le temps de fonctionnement à pleine puissance reste négligeable par rapport aux variables examinées précédemment.

Pour évaluer la sensibilité du confort ressenti par les occupants aux paramètres du bâtiment, on a réalisé des simulations en réalisant des coupures jusqu'au moment où la température opérative dépasse les limites de température. Ce type de simulation a été réalisé en 4.3.1.3, et elle permet de déterminer la limite en termes de temps de coupure pour chaque bâtiment.

Cette analyse de sensibilité va permettre de comprendre comment les différents paramètres influencent le temps d'application théorique de la coupure du chauffage.

La figure suivante montre la sensibilité du temps de coupure aux différents paramètres.

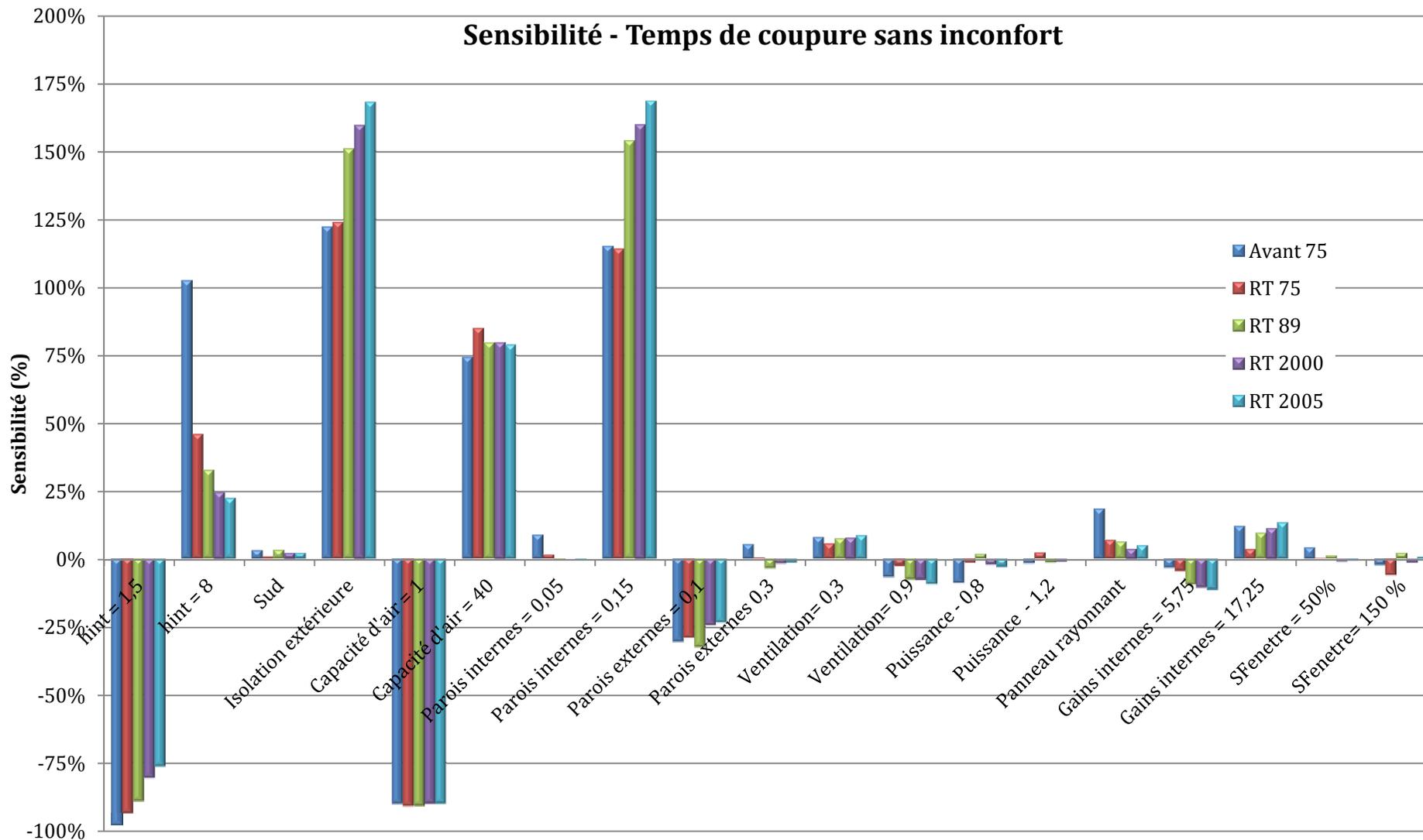


Figure 4-35 - Sensibilité du temps de coupure aux différents paramètres

La Figure 4-35 montre que les paramètres qui influencent le plus le temps de coupure sont :

- Le coefficient d'échange convectif intérieur (h_{int})
- L'isolation par l'extérieur des parois verticales
- La capacité de l'air
- L'augmentation de l'épaisseur (inertie) des parois internes

Un facteur déterminant pour le temps de coupure est l'inertie. L'inertie du bâtiment permet de stocker de la chaleur et ainsi lors d'une coupure, cette chaleur stockée permet que la température de la pièce descende plus doucement. Sur la Figure 4-26, on vérifie que tous les paramètres qui ont un impact direct ou indirect sur l'inertie influence effectivement le temps de coupure très fortement.

Le coefficient d'échange convectif intérieur (h_{int}) bas réduit les échanges de chaleur entre les parois et l'air. Cette réduction fait baisser le déstockage dans les murs, donc la température de l'air descend plus vite et les conditions d'inconfort seront atteintes plus rapidement. Avec la réduction de h_{int} , le temps de coupure est réduit en moyenne de 85%. Si on augmente h_{int} , le temps de coupure augmente en moyenne de 25%.

L'isolation par l'extérieur, l'augmentation de la capacité de l'air et l'épaisseur des parois internes augmentent l'inertie du bâtiment et permettent ainsi un meilleur stockage de en chaleur.

L'augmentation de l'épaisseur de la couche de béton de la paroi extérieure n'a pas un grand impact car dans la simulation l'isolation se fait par l'intérieur. En utilisant l'isolation par l'intérieur, la couche de plus grande capacité calorifique de la paroi (couche béton) ne peut pas être utilisée comme moyen de stockage de la chaleur.

Dans une étude menée par Artmann [Artmann & Manz, 2007], ces caractéristiques ont été également mises en évidence. Artmann a étudié l'influence du coefficient d'échange convectif intérieur (h_{int}) et de l'épaisseur des murs. Il montre que ces paramètres ont une influence notable sur la capacité du bâtiment à stocker de la chaleur est élevée. Plus « h_{int} » et l'épaisseur des murs ayant une capacité calorifique significative sont grands plus la capacité à stocker de la chaleur. La chaleur stockée maintien des conditions durant la coupure.

La ventilation, les gains internes et l'orientation de la pièce ont un faible impact sur le temps de coupure (moins de 10%).

Le panneau rayonnant n'a pas un impact très grand sur le temps de coupure.

En résumé, on peut dire que les paramètres qui augmentent l'inertie du bâtiment permette des coupures plus longues.

Cette analyse de sensibilité nous a permis d'une part de comprendre les paramètres les plus délicats dans nos simulations et de chiffrer leur influence sur les critères que nous avons utilisés pour évaluer les différentes stratégies d'effacement. D'autre part, cette analyse nous a permis d'identifier les paramètres qui font qu'un bâtiment est plus au moins adapté à l'effacement.

4.3.7. Applicabilité des stratégies de contrôle

Les études menées dans ce chapitre sont basées sur plusieurs hypothèses. Dû fait que l'étude de ces stratégies reste théorique, on discute à présent quelques points qui pourront aider à la mise en place de ces contrôles et à bien évaluer leurs effets.

Dans notre étude, on a considéré une consigne constante, cependant des consignes de chauffage intermittentes sont souvent utilisées. Si de telles intermittences sont utilisées, les températures lors des coupures peuvent être inconfortables, spécialement vers 18/19 heures car au moment où les occupants réintègrent leur logement la relance de chauffage n'a pas encore permis d'atteindre des températures intérieures confortables.

Il peut arriver qu'au moment de la coupure le bâtiment soit inoccupé, dans ce cas les questions d'inconfort et de la longueur du temps de coupure ne se posent pas. Une solution possible passe par l'utilisation de systèmes de détection de présence. De plus, l'utilisation de ces systèmes permettra aussi de connaître avec plus de précision les profils d'occupation et donc d'optimiser le fonctionnement du chauffage électrique en fonction des habitudes des occupants et des tarifications d'électricité.

Dans la présente étude, on a pu voir le rôle prépondérant du dimensionnement de la puissance du chauffage électrique, dans le temps à pleine puissance après la coupure et dans le calcul de la surconsommation. En ce sens, des études menées sur le terrain pourraient aider à préciser les puissances réelles installées dans les logements et permettre la réalisation de simulations plus précises.

Dans le cas des contrôles à distance des équipements, toutes les stratégies n'ont d'impact que si les occupants des logements n'ont pas recours à des systèmes électriques non commandés et en particulier à des chauffages électriques d'appoint amovibles.

Comme on l'a vu au chapitre précédent, les zones de confort sont basées sur des hypothèses d'activité des occupants et de leur tenue vestimentaire. Ainsi, on peut considérer que les occupants des bâtiments Avant 75, se sont adaptés à des températures plus basses que les valeurs indiquées dans les normes de confort thermique [en1, 2007], [en7, 2006], en utilisant des vêtements plus chauds par exemple. Cependant, de nouvelles études devront être menées dans ce domaine afin de préciser la sensation d'inconfort thermique des occupants selon leur environnement et en régime dynamique.

4.4. Sélection d'une stratégie de contrôle

Comme on a pu voir, chacune de ces stratégies de contrôle présentent des impacts sur la consommation et sur le confort très différents.

Dans le but de contribuer au processus de décision de la stratégie de contrôle la plus adaptée à un cas précis, nous proposons dans la suite une analyse multicritères de différentes stratégies testées.

Dans notre cas d'étude, on s'est focalisé sur les pointes électriques hivernales journalières qu'occurent généralement à 19 heures. Pour cela, nous avons choisi les données météorologiques, où la température externe est plus faible que 3 °C, car c'est lors des périodes de grand froid que le

système électrique français est sur grand stress. De plus, nous avons choisi dans ce cas d'étude un bâtiment correspondant aux caractéristiques de la RT 89 et pour simplifier la lecture de cette analyse on s'est concentré sur trois stratégies de contrôle :

- 1- Coupure simple
- 2- Coupure avec condition de bande morte
- 3- Passage en mode-eco

Deux analyses reposant sur des couples de critères différents ont été menées :

- Une première analyse énergétique reposant sur l'évaluation simultanée de l'impact énergétique et du recouvrement
- Une seconde analyse reposant sur l'évaluation de l'impact énergétique et de l'inconfort

Ces éléments permettront de contribuer au choix de la stratégie à mettre en œuvre.

4.4.1. Analyse énergétique

L'analyse énergétique se fait en prenant en compte l'impact énergétique et le taux de recouvrement dus à l'application d'une stratégie. Les figures suivantes montrent l'exemple de cette analyse pour le cas d'une maison individuelle et pour un appartement respectivement.

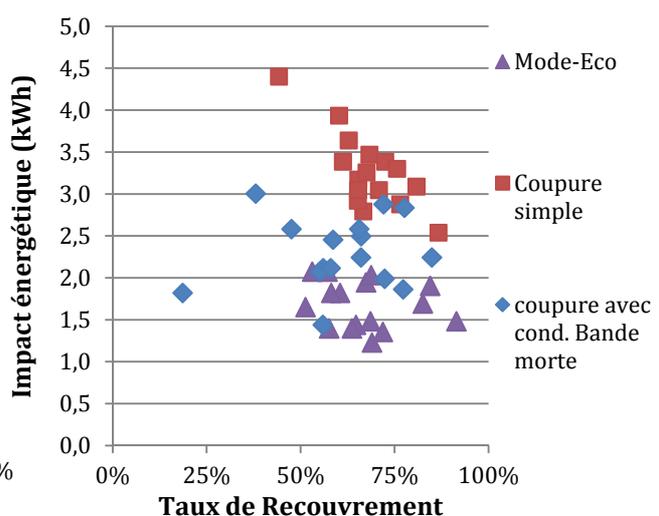
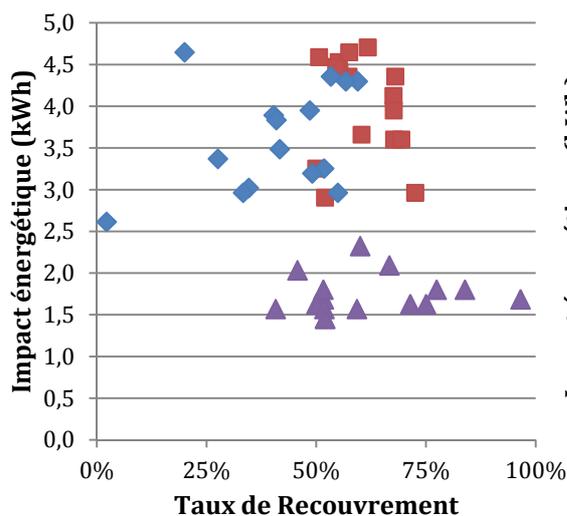


Figure 4-37 – Analyse énergétique - Maison Individuelle

Figure 4-36- Analyse énergétique – Appartement

Dans le cas optimal, on devrait avoir un impact énergétique le plus grand possible et un taux de recouvrement le plus faible possible (c.-à-d. une faible surconsommation). Au contraire, la stratégie à éviter sera celle qui aura un faible impact énergétique et un grand taux de recouvrement.

Dans le cas analysé, on peut voir que dans le cas de la maison individuelle la coupure avec condition de bande morte présente les meilleures valeurs, car elle permet d'avoir un impact énergétique équivalent à la coupure simple toute en ayant un faible taux de recouvrement.

L'analyse de l'appartement montre que la différence entre les stratégies de contrôle n'est pas aussi évidente que dans le cas de la maison individuelle. Cependant, pour le même taux de recouvrement on peut voir que la coupure simple permet d'avoir un impact énergétique plus grand.

Dans le cadre de cette première analyse, le passage en mode-éco est la stratégie qui présente des valeurs performantes parmi les trois stratégies étudiées.

4.4.2. Impact énergétique vs inconfort

Le pilotage des équipements a un impact sur les consommateurs. Dans notre cas cet impact est mesuré par l'inconfort thermique généré. Ainsi, on compare les impacts énergétiques avec l'inconfort généré.

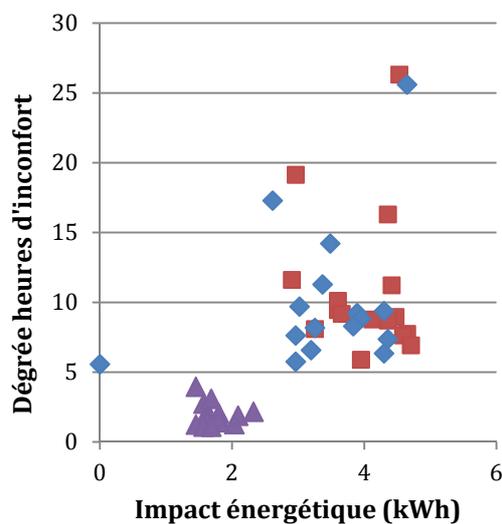


Figure 4-39- Impact énergétique vs inconfort
– Maison Individuelle

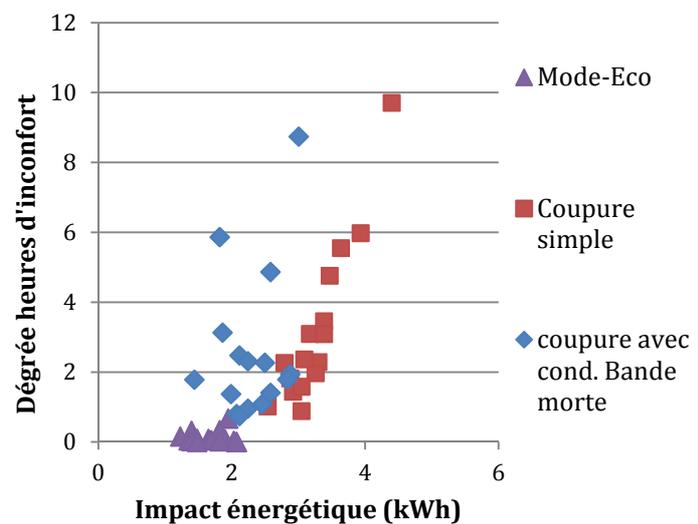


Figure 4-38- Impact énergétique vs inconfort - Appartement

Dans ce cas, on cherche une stratégie qui nous permet d'avoir un grand impact énergétique et en même temps un faible inconfort (Degrés_heures d'inconfort).

Dans le cas de la maison individuelle, les stratégies coupure simple et coupure avec condition de bande morte présentent des grands impacts énergétiques, mais aussi de grands inconforts. D'autre part, le passage en mode-éco va permettre une réduction très grande de l'inconfort tout en gardant un impact énergétique non négligeable.

Pour l'appartement, les différences entre les stratégies de contrôle deviennent plus marquantes. En termes d'impact énergétique le passage en mode-éco et la coupure avec condition de bande morte restent proches. Cependant quand on analyse l'inconfort, la stratégie de passage en mode-éco présente des valeurs nettement inférieures.

On peut conclure que dans ce cas, en considérant le consommateur comme partie intégrante de notre analyse, la stratégie à valoriser est le passage en mode-éco et non la coupure avec condition de bande morte comme dans l'analyse énergétique.

Ainsi, le consommateur devra être faire partie prenante de l'étude et l'acceptabilité des stratégies de contrôle devra être prise en compte.

4.5. Analyse des gains monétaires pour le consommateur

L'application des stratégies de contrôle se fait généralement par deux types de contrôle : le contrôle à distance ou le contrôle local en fonction des tarifs.

Le contrôle à distance du chauffage électrique par les producteurs et/ou fournisseurs d'électricité permet une réduction, voir l'arrêt de la consommation pendant une certaine période de temps. Cependant, pour que ces contrôles soient acceptés, les consommateurs demandent une amélioration du service fourni. Dans le cas du contrôle de l'eau chaude sanitaire en France, cette amélioration réside dans l'optimisation de la consommation électrique, en fonction des tarifs heures creuses / heures pleines, par le chauffage de l'eau pendant les heures creuses, permettant aux consommateurs de réaliser des économies monétaires.

Dans le cas du contrôle du chauffage, l'amélioration de service provient des gains monétaires engendrés par l'application d'une stratégie de contrôle. Le poids de l'incitation devient plus fort si des conditions inconfortables sont atteintes lors de l'application d'une stratégie. L'incitation monétaire apparaît alors comme une compensation pour l'inconfort créé.

On peut aussi imaginer que le contrôle des équipements peut être effectué par un contrôleur local comme une « Energy Box ¹⁸ » ou par l'utilisateur lui-même, en réagissant à des signaux de prix. Dans ce cas, le contrôle du chauffage électrique consiste en une optimisation de son fonctionnement en fonction des tarifs d'électricité.

Pour les différentes stratégies de contrôle, on a étudié les gains ou pertes monétaires engendrés par leur application lors des pics de consommation (de 18 à 20 h en hiver) pour différents types de tarification présentés ci-dessous :

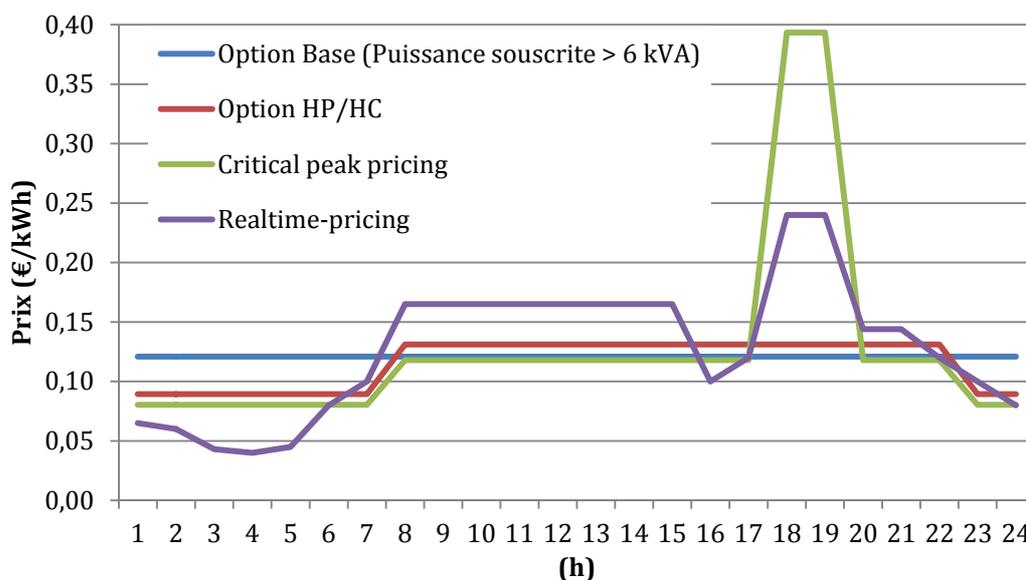


Figure 4-40 - Tarifications analysées

¹⁸ - « Energy Box » - boîtiers qui donnent accès au relevé détaillé de consommation en temps réel et qui dans certains cas permettent le contrôle des équipements.

Les tarifications hypothétiques sont décrites ci-dessous:

- *Option base* – prix constant tout au long de la journée
- *Option Heures pleines/heures creuses (HP/HC)* – deux échelles de prix : un prix bas pendant la nuit et un prix élevé pendant la journée jusqu'à 23 heures.
- « *Critical peak pricing* » (*CPP*) - le fonctionnement de ce type de tarif est identique à la tarification HP/HC, mais entre 18 et 20 heures le prix augmente d'un facteur trois. Pour compenser cette augmentation, pendant les heures restantes le prix est réduit de 10 % par rapport à la tarification HC/HP.

Note : Tarification inexistante dans le marché actuel en France.

- « *Real-time-pricing* » (*RTP*) – Cette tarification est basée sur les prix réels de production, transmission et distribution de l'électricité.

Note : Tarification inexistante dans le marché actuel en France, créée à partir des prix du marché *SPOT*

Pour le choix de la tarification CPP, nous nous sommes basés sur l'étude menée par [Jongejan et al., 2010] qui analyse les différents types de tarifs CPP utilisés dans les programmes de gestion de la demande. Ces tarifs utilisent généralement des prix d'extrême pointe entre 3 à 7 fois supérieurs au tarif correspondant aux heures creuses. Dans notre cas, le prix pendant les heures de pointe est 4 fois supérieur.

Pour compenser les prix très élevés pendant les heures de pointe, des réductions de quelques centimes sont généralement appliquées aux autres périodes.

Dans ces programmes, le prix élevé est mis en place pendant les heures les plus problématiques pour le réseau. Dans le cas du réseau français, la période de pointe se situe entre 18 et 20 heures. Ainsi, on applique un prix augmenté d'un facteur trois pendant ces heures.

La tarification RTP va dépendre fortement du réseau électrique où cette tarification est mise en œuvre. Dans notre étude, nous avons pris comme hypothèse que le tarif aurait la même forme que les prix du marché SPOT d'électricité un jour de semaine typique (Mardi ou Jeudi).

Le tableau suivant montre les différences en termes de facture mensuelle entre les différents tarifs et le tarif de base.

Tableau 4-24 – Différences entre la facture avec option base et les autres tarifications

	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
<i>HC/HP</i>	-5,1%	-5,1%	-5,2%	-5,2%	-5,2%
<i>CPP</i>	1,9%	1,6%	1,4%	0,9%	0,7%
<i>RTP</i>	3,1%	2,9%	2,8%	2,6%	2,5%

On peut voir que si aucune stratégie de contrôle n'est appliquée, c'est l'option tarifaire « RTP » qui donnera les factures mensuelles les plus élevées suivie de l'option « CPP ». Le tarif HC/HP à son tour présente une facture moins élevée que le tarif Base. Cependant, généralement, les différences ne sont pas très élevées.

L'augmentation pour les tarifs CPP et RTP est due essentiellement aux prix élevés lors des heures de pointe (18-20 heures).

On va maintenant analyser les économies monétaires pour les différents tarifs. La figure suivante montre les économies mensuelles réalisées grâce à l'application de différentes stratégies de contrôle pour la tarification Base.

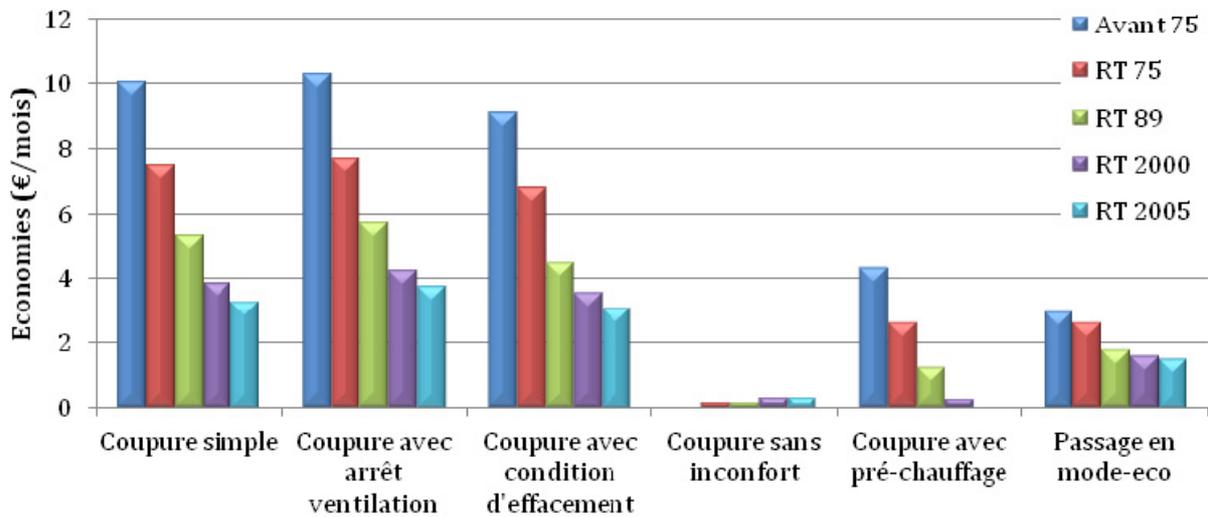


Figure 4-41 – Économies réalisées avec la tarification base – Maison individuelle

Les économies sont plus élevées pour les stratégies suivantes : coupure simple, coupure avec arrêt de ventilation et coupure avec condition d'effacement. Cependant, on peut voir que pour des coupures sans inconfort les gains sont très faibles.

Comme le tarif est constant, la stratégie avec préchauffage amènera moins d'économies que les autres stratégies. Comme on l'a vu auparavant, cette stratégie peut avoir des recouvrements supérieurs à 100 % très souvent. Les bâtiments construits selon la RT2005 peuvent même conduire à de pertes.

De même, la stratégie «Passage en mode-éco » donne moins d'économies que les autres stratégies, car on consomme de l'électricité pendant la coupure, réduisant ainsi l'impact énergétique.

La figure suivante montre les économies monétaires moyennes réalisées pour le tarif HC/HP par rapport à une simulation sans aucune stratégie de contrôle et les degrés heures d'inconfort moyennes.

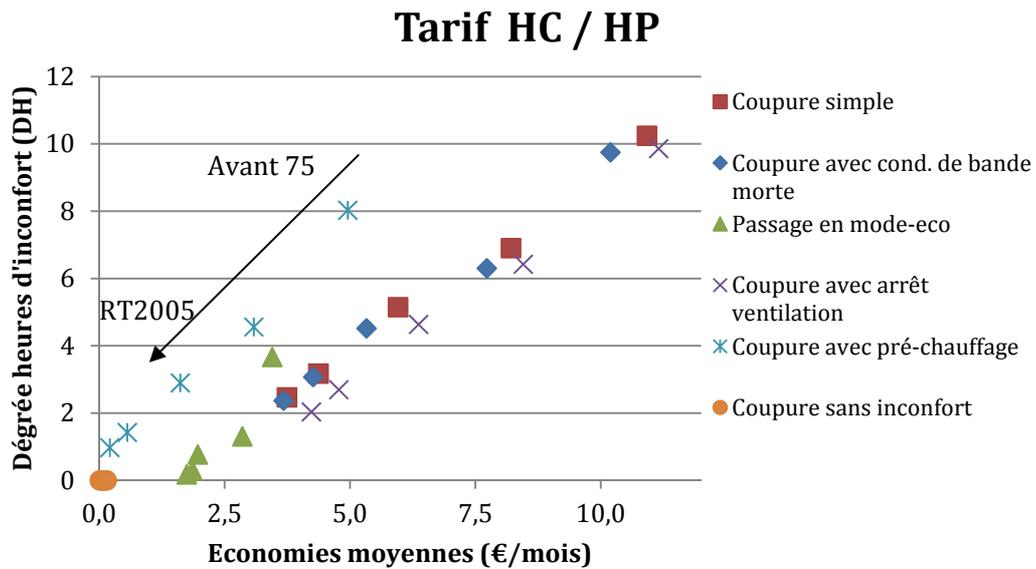


Figure 4-42 – Économies/inconfort réalisés avec la tarification HC/HP- Maison individuelle

La Figure 4-42 montre les gains mensuels moyens, pour la tarification HC/HP pour les différentes périodes de construction (plus d'économies, mois récent est le bâtiment) et l'inconfort généré. Dans le cas optimal, on devrait avoir des grandes économies avec un faible inconfort.

Il n'y a pas de grande différence, en termes de gains, entre la coupure simple, la coupure avec arrêt de ventilation et la coupure avec condition d'effacement.

Les économies restent du même ordre de grandeur qu'avec la tarification de base, avec des différences de moins d'un euro (€). Comme la phase de recouvrement est en partie réalisée pendant les heures pleines (HP), la différence avec la tarification de base est faible.

Pour réaliser des économies plus importantes, les signaux de prix devront être plus forts pendant les périodes de pointe et plus faibles hors pointe. Une des tarifications qui permet cet effet est le tarif CPP, où les prix entre 18 heures et 20 heures sont très élevés.

Les stratégies qui présentent un inconfort plus faible, présentent elles aussi des économies plus faibles, comme c'est le cas des stratégies de passage en mode-eco et la coupure avec pré-chauffage. La coupure sans inconfort présente des économies très faibles, de l'ordre de quelques centimes d'Euro.

On va maintenant étudier les économies et l'inconfort engendrés par l'application des différentes stratégies de contrôle avec le tarif CPP.

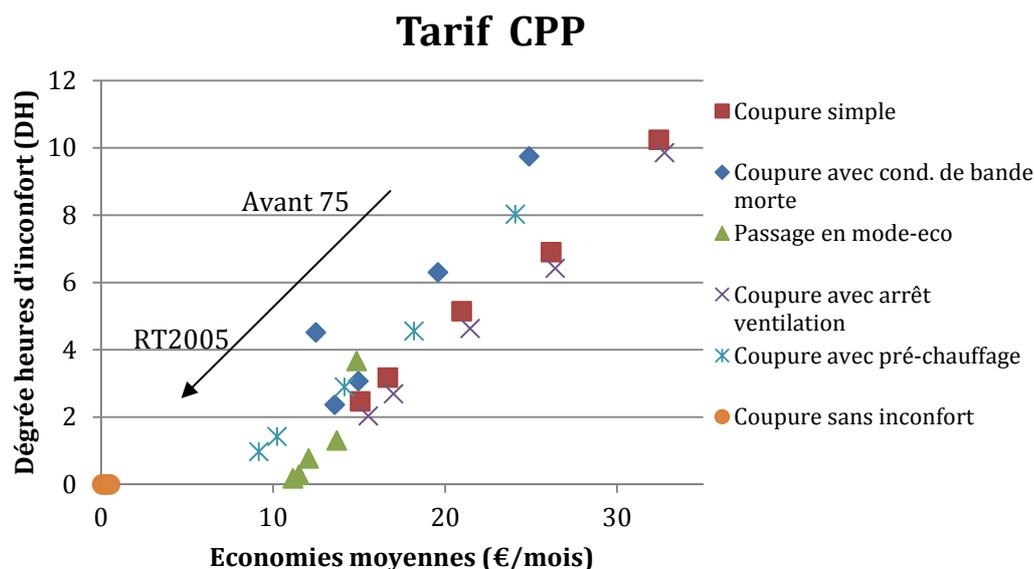


Figure 4-43 – Économies/inconfort réalisés avec la tarification CPP – Maison individuelle

On réalise d'abord que cette tarification permet une augmentation des économies, pouvant aller jusqu'à 32 €/mois.

A cause des prix très élevés pendant la tranche 18-20 heures, les consommateurs devront éviter au maximum l'utilisation du chauffage pendant ces heures. Ainsi, quand on réduit la consommation pendant cette période, les économies deviennent plus importantes.

Pour la stratégie « coupure sans inconfort », le temps effectif de coupure est normalement plus court, spécialement pour les bâtiments anciens. Avec l'utilisation de cette stratégie, les économies sont presque nulles.

Les autres stratégies de contrôle auront le même type de résultats que pour le tarif HC/HP, mais pour le cas du tarif CPP les économies seront plus élevées.

En faisant le bilan entre l'inconfort engendré moyen et les économies, la stratégie « passage en mode-éco » permettra un compromis entre économies et inconfort. Cependant, cet équilibre va dépendre de l'acceptabilité par chaque consommateur (spécialement pour la stratégie « passage en mode-éco »).

D'autres tarifications existent, encore plus complexes, comme le « *Real-time-pricing* » où le prix d'électricité est très variable. Normalement, le prix de l'électricité change chaque heure. Les données, avec les prix, sont envoyées soit la veille soit avec quelques heures de déphasage. Un exemple de l'application des stratégies de contrôle avec cette tarification est maintenant analysé.

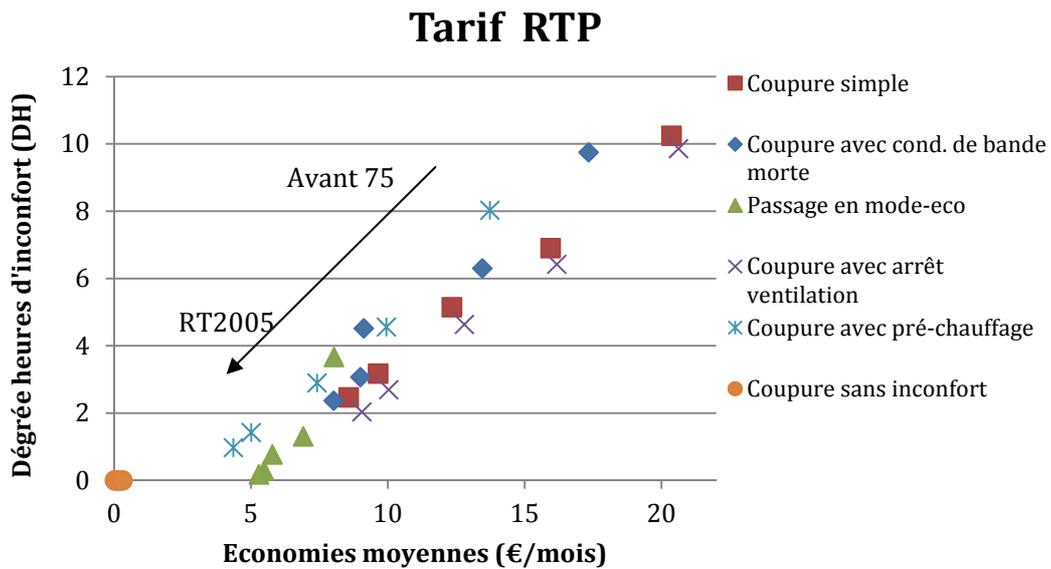


Figure 4-44 - Économies réalisés avec la tarification RTP – Maison individuelle

Ce tarif permet en général des économies plus élevées que le tarif HC/HP et le tarif Base.

Comme pour les autres tarifs, la forme du graphique reste presque inchangée. Seule l'amplitude des économies est influencée.

À nouveau, la stratégie « passage en mode-éco » reste celle qui a le meilleur rapport économies/inconfort.

Il faut dire toutefois que cette tarification présente des valeurs différentes tous les jours, et du fait de sa complexité impose un contrôle du chauffage optimisé pour profiter au maximum de la tarification.

Comme on l'a vu, les économies monétaires peuvent atteindre 30 €/mois ou 1 €/jour. Dans notre cas d'étude, on considère que les coupures sont effectuées tous les jours, pour des bâtiments qui utilisent le chauffage sans interruption. De plus, si on prend en compte que les occupants pourront être absents pendant quelques jours par semaine les économies par mois seront plus faibles.

Les résultats montrent que la tarification CPP permettra des gains plus élevés par rapport aux autres tarifs.

Un tel tarif est habituellement utilisé pour faire face à des périodes où le réseau électrique est plus fragilisé (habituellement les jours plus froids de l'année), soit environ une dizaine de jours/an. Pour les jours les plus froids, les économies varient entre 2 et 1 €/jour. Si ce type de tarification est appliqué seulement pendant 10 jours, les économies engendrées par les coupures seront beaucoup plus faibles.

Néanmoins, même en utilisant les tarifications existantes (Base et HC/HP) des économies non négligeables sont atteintes, si des coupures sont effectuées tous les jours.

On a réalisé que des coupures sans affecter le confort thermique permettront des économies très faibles. Dans ce sens, une étude sur la l'acceptabilité des différentes stratégies de contrôle, voir l'inconfort, par rapport aux économies engendrées.

4.6. Conclusion – Evaluation de la flexibilité du chauffage électrique

Dans ce chapitre, on a pu voir que la coupure simple permet une réduction de la consommation, mais l'inconfort généré ne peut pas être négligé. Pour la coupure simple, on a étudié le temps maximal de coupure sans affecter le confort. Cette étude nous a permis de déterminer que les bâtiments récents permettent des coupures avec un impact énergétique plus grand que pour les bâtiments anciens, quand les coupures se réalisent dans la plage de confort.

Les coupures avec condition de bande morte ont permis une légère amélioration du confort par rapport à la coupure simple, mais aussi une réduction de l'impact énergétique et de la surconsommation. Cependant, cette stratégie de contrôle est très dépendante de l'inertie choisie pour le nœud d'air.

La coupure du chauffage liée à la coupure de la ventilation va permettre d'avoir le même impact énergétique mais avec un meilleur confort et une surconsommation réduite.

La coupure liée au préchauffage du bâtiment permet une amélioration du confort spécialement pour les bâtiments plus inertes (Appartement). Cependant, à cause de la phase de préchauffage la surconsommation finale sera plus élevée que pour la coupure simple.

Le passage en mode-éco permet un meilleur confort pendant la coupure. Même si le temps hors confort reste élevé, les degrés-heures d'inconfort sont réduits par rapport à la coupure simple. L'impact énergétique et la surconsommation sont nettement réduits (plus de que 50%) par rapport à la coupure simple.

Des combinaisons de ces stratégies sont possibles, mais l'objectif de cette étude a été de montrer les différentes caractéristiques et potentialités de chaque stratégie.

Ensuite on a réalisé une étude de sensibilité aux différents paramètres de simulation. On a chiffré la sensibilité de chaque paramètre sur les effets énergétiques et sur le confort. Tous les paramètres qui vont ajouter de l'inertie ou donner plus d'importance au rôle de l'inertie ont l'impact le plus important sur le confort thermique. Parmi ces paramètres on trouve :

- i. L'inertie du nœud d'air
- ii. Le placement de l'isolation dans les parois : extérieur ou intérieur.
- iii. Le coefficient de convection intérieur
- iv. L'épaisseur des parois internes

Le temps à pleine puissance sera très influencé par le dimensionnement du chauffage car ce paramètre aura comme impact une remontée plus ou moins rapide de la température jusqu'à la valeur de consigne.

Une étude sur comment sélectionner une stratégie a été menée on faisant appelle à deux évaluations différentes, analyse énergétique et analyse de l'impact énergétique vs inconfort.

On a aussi réalisé une étude sur les gains monétaires pour les consommateurs si les stratégies de contrôle étudiées sont appliquées pendant les heures de pointe (18-20 h). Ces stratégies ont été évaluées avec différents types de tarifications existantes et innovantes.

La tarification CPP (« *Critical peak pricing* ») avec des prix élevés de 18 à 20 h et une réduction de prix en dehors de cette plage, permet de réaliser des économies importantes. Ce type de tarification permet de donner un vrai signal aux consommateurs les encourageant à ne pas consommer pendant les heures de pointe. Les économies totales peuvent aller jusqu'à 32 €/mois dans les bâtiments anciens. Cependant, des conditions inconfortables seront créées lors de l'application des stratégies de contrôle.

La tarification RTP permet des gains moins importants, et du fait de sa complexité doit être couplée à des systèmes d'optimisation pour que les économies soient maximisées. Cependant, du fait que les profils d'occupation changent très souvent dans le secteur résidentiel, des méthodologies doivent être développées pour permettre de réaliser cette optimisation.

Une des conclusions de ce chapitre, c'est que le consommateur représente une partie très importante de dans l'étude de la gestion de la demande résidentiel. Ainsi, les critères d'acceptabilité des consommateurs devront être toujours considérés sérieusement.

Chapitre V – Analyse de l’impact des stratégies de contrôle sur un réseau de distribution

Table de Matières - Chapitre V

5. Analyse de l'impact des stratégies de contrôle sur le réseau de distribution	176
5.1. Coupure simple.....	176
5.2. Coupure foisonnée des bâtiments.....	177
5.3. Coupure pendant 2 heures avec condition de bande morte	179
5.4. Coupure sans inconfort.....	181
5.5. Coupure avec Préchauffage.....	181
5.6. Passage en mode-éco	182
5.7. Analyse des effets énergétiques	183
5.8. Conclusion – Analyse de l'impact des stratégies de contrôle sur le réseau de distribution..	186
.....	186

5. Analyse de l'impact des stratégies de contrôle sur le réseau de distribution

Une fois analysés les cas d'application particuliers des stratégies de contrôle, on analyse maintenant les effets de l'application des différentes stratégies sur la courbe de charge au niveau du réseau de distribution.

Si les données d'un parc sont connues, les simulations représentant le comportement de ce parc de bâtiments pourront être effectuées avec plus de précision. Dans notre étude, on n'avait pas de données sur un parc de distribution, c'est pourquoi on a simulé un groupe de 250 bâtiments, pendant les mois de janvier et février, pour la région de Trappes (données *Meteonorm [Meteotest, 2006]*). Les caractéristiques de ces bâtiments ont été choisies selon la distribution présentée sur la Figure 4-3.

A chaque simulation, afin d'obtenir une réponse différente, les paramètres suivants sont modifiés de +/- 5% :

- Epaisseur des murs internes
- Débit de ventilation
- Taille des fenêtres
- Gains internes

De plus, la capacité du nœud d'air est modifiée entre +/- 25%. L'orientation du bâtiment est elle aussi modifiée.

On va d'abord analyser les effets de chaque stratégie de contrôle sur la courbe de charge. Ensuite, on quantifiera les impacts en termes d'énergie et en termes de puissance appelée lors de la mise en route du chauffage.

5.1. Coupure simple

La figure suivante montre la courbe de charge agrégée dans le cas de la coupure simple.

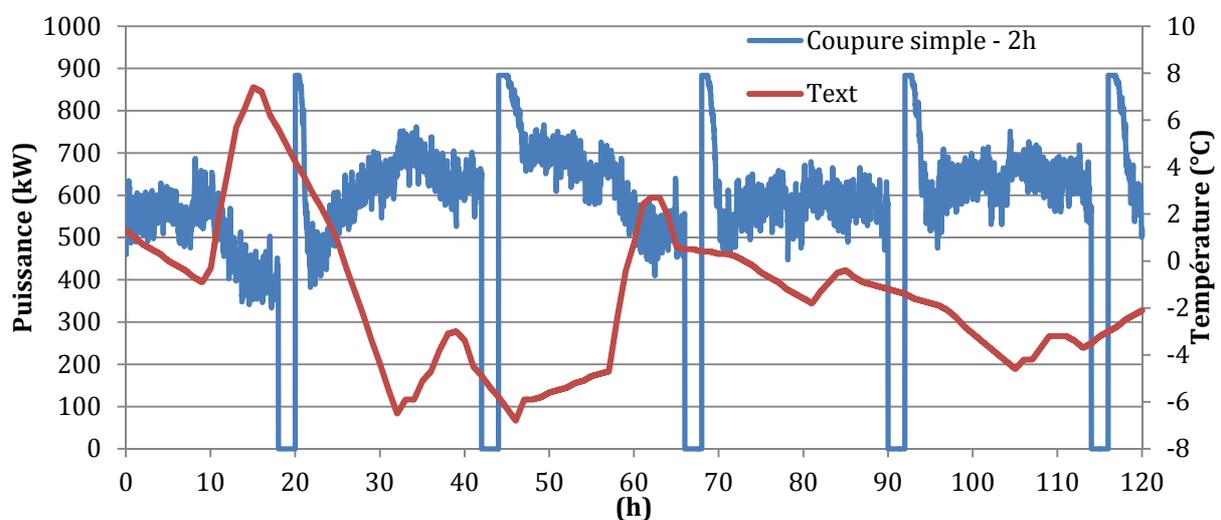


Figure 5-1 – Effets sur la courbe de charge agrégée - Coupure simple pendant 2 heures

Comme pour l'analyse à l'échelle du bâtiment en 4.3.1, on peut voir que la puissance est effacée. Lors de la mise en route des équipements de chauffage, chaque bâtiment doit faire remonter la température jusqu'à la température de consigne et donc le chauffage va fonctionner à pleine puissance. Du fait qu'après la coupure tous les bâtiments sont mis en route au même instant, il y a une perte de foisonnement caractéristique dans un groupe de bâtiments. Cette perte de foisonnement après une coupure et les pics de consommation résultants est connue comme l'effet « *Cold load Pickup* ». Cette problématique a notamment été étudiée dans les travaux de [ORPHELIN, 1999] et [Agneholm & J.Daalder, 2000].

Agneholm et Daalder [Agneholm & J.Daalder, 2000] montrent que cet effet est grandement influencé par le temps de coupure et par la température extérieure. Une des manières de réduire l'effet de « *cold load pick-up* » c'est d'utiliser des coupures tournantes ou foisonnées. Dans la suite, on présentera des résultats pour les coupures foisonnées.

La stratégie de coupure avec arrêt de la ventilation donne des résultats identiques à la coupure simple. La seule différence c'est que le recouvrement devient un petit peu plus faible (-2,5 %). Les pics de consommation après la coupure restent pratiquement identiques. Pour ces raisons, l'application de la stratégie « coupure avec arrêt de ventilation » sur un parc de logements n'est pas présentée davantage.

5.2. Coupure foisonnée des bâtiments

Avec l'objectif de réduire les appels de puissance après la coupure, on a réalisé des simulations en essayant de foisonner le signal de coupure.

La stratégie se base sur le même principe que la coupure simple, mais au lieu de couper tous les équipements de chauffage en même temps, on coupe par exemple la moitié des bâtiments pendant la première heure et la deuxième moitié pendant la deuxième heure. Ainsi l'effet de « *Cold load pickup* » ne sera pas très accentué.

A cause des temps de coupure plus faibles, les impacts sur le confort thermique chez les occupants sont réduits par rapport à la coupure simple. Cependant cette stratégie ne doit pas être comparée à la coupure simple au niveau local (à l'échelle d'un bâtiment) car le temps de coupure total (entre 18 et 20 heures) unitaire est moins élevé.

Le foisonnement peut être aussi appliqué aux autres stratégies de contrôle analysées dans cette étude.

On a étudié deux cas de foisonnement :

- 1- Couper la moitié des équipements de chauffage de 18-19h et la deuxième moitié de 19-20h
- 2- Couper la moitié des équipements de chauffage pendant les premières 30 minutes et les rallumer pendant les 30 minutes suivantes. Ce cycle est répété deux fois (entre 18 heures et 20 heures).

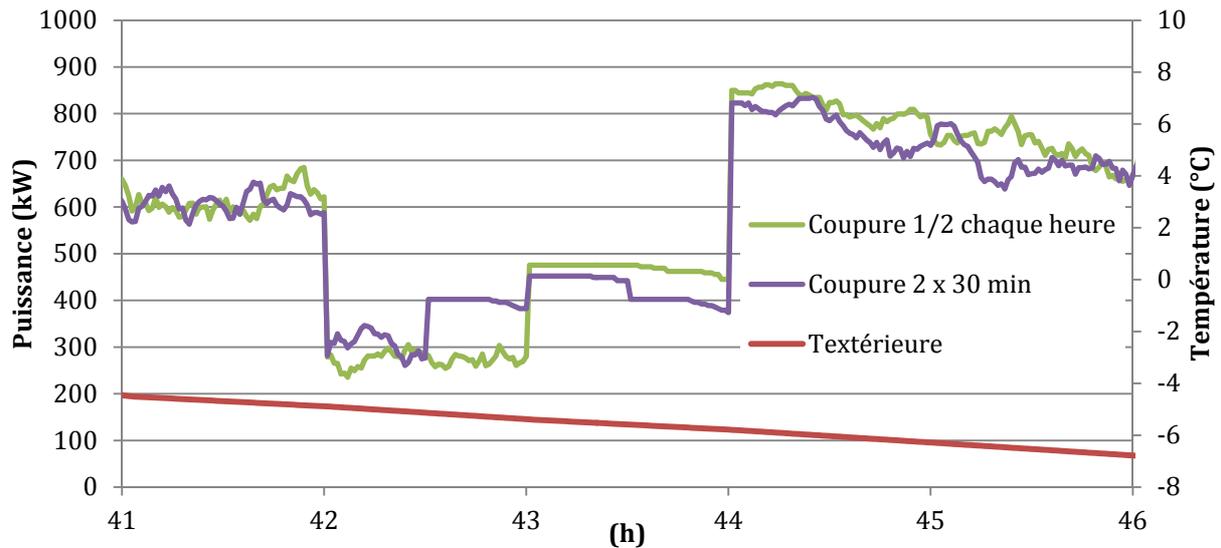


Figure 5-2 – Effets sur la courbe de charge agrégée – pour les deux types de foisonnement

Dans la Figure 5-2 on peut voir les effets des coupures avec deux types de foisonnement.

Pour le premier type de foisonnement, on observe une réduction de la puissance pendant la première heure, correspondant à la coupure de la moitié des bâtiments. Lors du début de la deuxième heure, les équipements de chauffage qui étaient éteints sont allumés. Les autres bâtiments sont à leur tour coupés.

Ainsi pendant la deuxième heure, la réduction de puissance de la deuxième moitié des équipements de chauffage est réduite à cause de la relance de la première moitié.

Le deuxième cas de foisonnement va permettre dans la première demi-heure une réduction équivalente au premier type. A la fin de la première demi-heure, une partie de la puissance effacée par la deuxième moitié des bâtiments est compensée par la surconsommation des bâtiments précédemment coupés. Cet effet est moins visible dans les deux demi-heures suivantes, où la puissance reste sensiblement stable et avec une valeur plus réduite que la valeur de la puissance initiale (environ 175 kW).

Un tel déploiement des stratégies de coupure crée une réduction de l'ensemble des effets énergétiques. Cependant, l'objectif de ces stratégies est la réduction de la puissance appelée après la coupure. La figure suivante compare les puissances appelées après la coupure, pour les deux cas de foisonnement et pour la coupure simple.

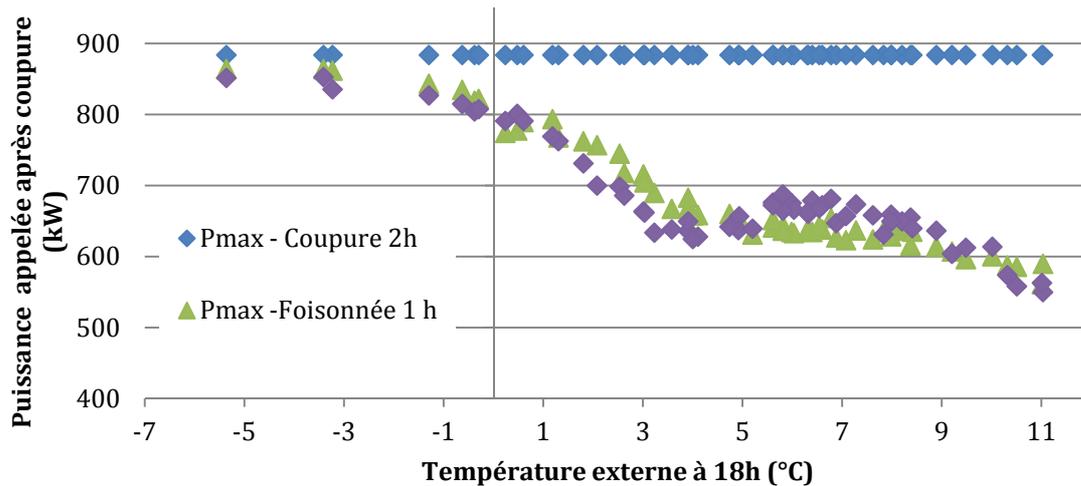


Figure 5-3 – Puissance appelée après la coupure- Coupure simple et coupures foisonnées

Pour des températures douces (jusqu'à 3 °C) les puissances appelées sont environ 25 % plus faibles que pour la coupure simple. Cependant, pour des températures extérieures plus faibles, la puissance appelée après coupure pour les stratégies avec foisonnement augmente.

Quand les températures extérieures sont proches de la température de dimensionnement, seules quelques bâtiments n'ont pas le chauffage allumé après le signal de contrôle (après 20 h) et donc la puissance agrégée devient très proche de la coupure simple. Ainsi, on peut conclure que la stratégie de foisonnement ne permet pas de réduire les pics de puissance, après la coupure, pour ces températures

5.3. Coupure pendant 2 heures avec condition de bande morte

Une autre stratégie simulée, dans l'étude présente, est la coupure avec condition d'effacement. Avec l'application de cette stratégie, il y a un décalage des consommations de quelques minutes jusqu'à une demi-heure en moyenne. La figure suivante montre les résultats de simulation d'un groupe de bâtiments simulé avec cette stratégie et avec la coupure simple pour un jour très froid.

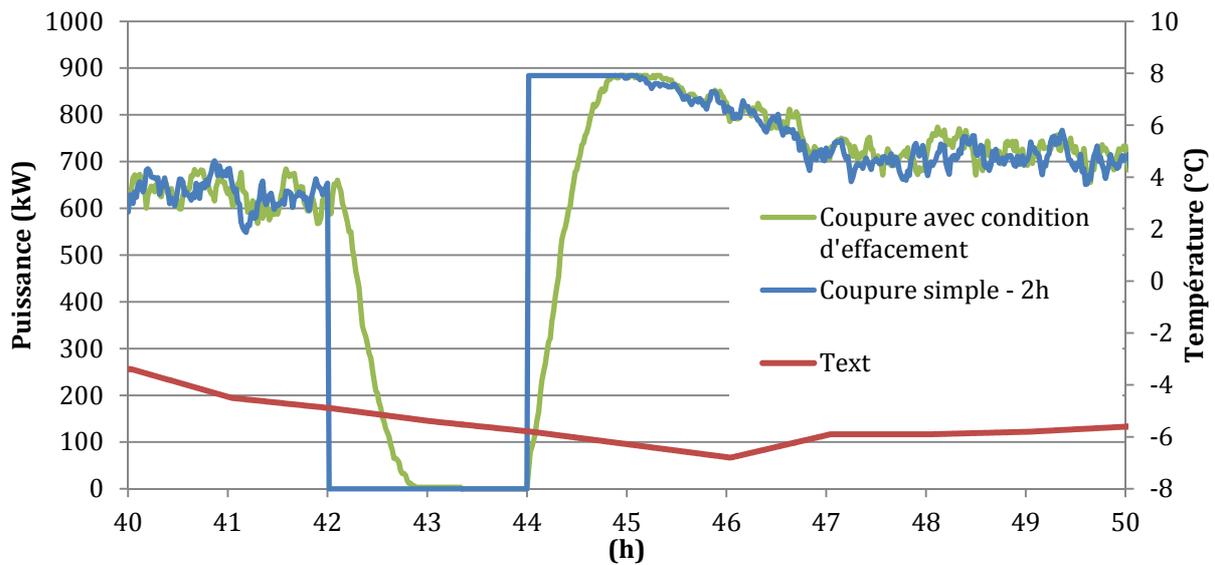


Figure 5-4 – Effets sur la courbe de charge agrégée - Comparaison de la coupure simple avec la coupure avec condition de bande morte

Les résultats montrent que l'effacement avec condition de bande morte permet que lors de la mise en route des chauffages (après la coupure) la remontée en puissance soit plus douce. Cependant, après le signal de coupure (heure 42), seuls quelques bâtiments seront effacés. L'effacement total de la puissance se réalise seulement 40 minutes après le signal de coupure (42 h).

Après la coupure, le temps à pleine puissance est réduit de presque une heure, mais la puissance nominale du parc simulé est atteinte.

Pour des températures extérieures plus élevées, cette stratégie permet que la puissance appelée soit plus réduite que la puissance nominale du groupe de bâtiments simulés. Un exemple est montré dans la figure suivante.

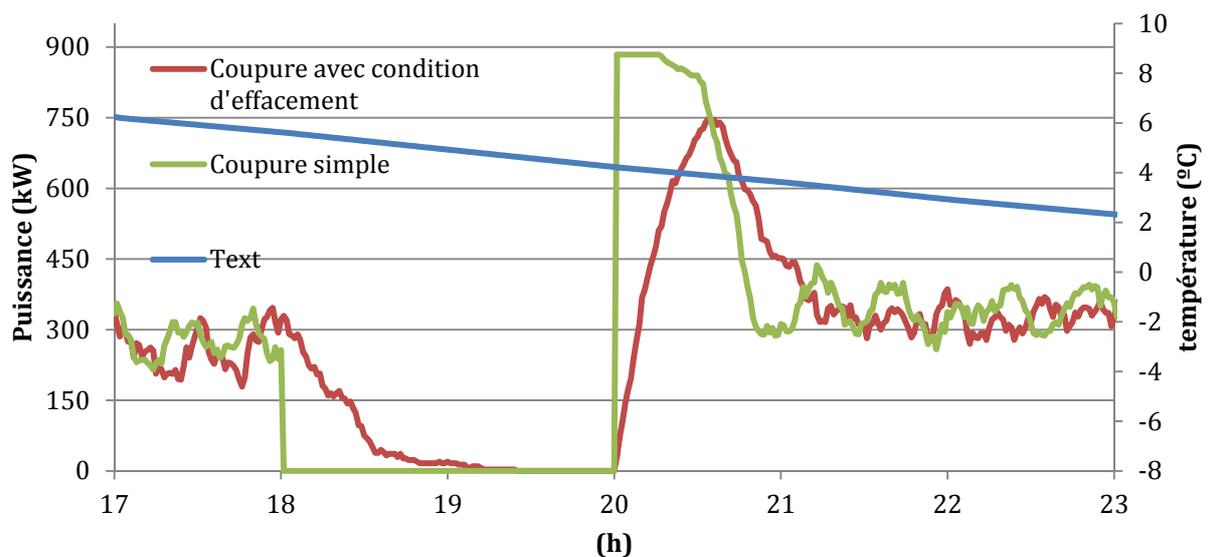


Figure 5-5 – Effets sur la courbe de charge agrégée - Coupure avec condition d'effacement pour une température extérieure positive

Sur la Figure 5-5, on peut voir que pour des températures extérieures plus élevées, la puissance maximale appelée est réduite d'environ 150 kW.

5.4. Coupure sans inconfort

En appliquant cette stratégie, le temps de coupure sera différent pour chaque bâtiment. Cette stratégie va ainsi créer un foisonnement automatique dans le fonctionnement des équipements de chauffage. La figure suivante montre les effets sur la courbe de charge de cette stratégie.

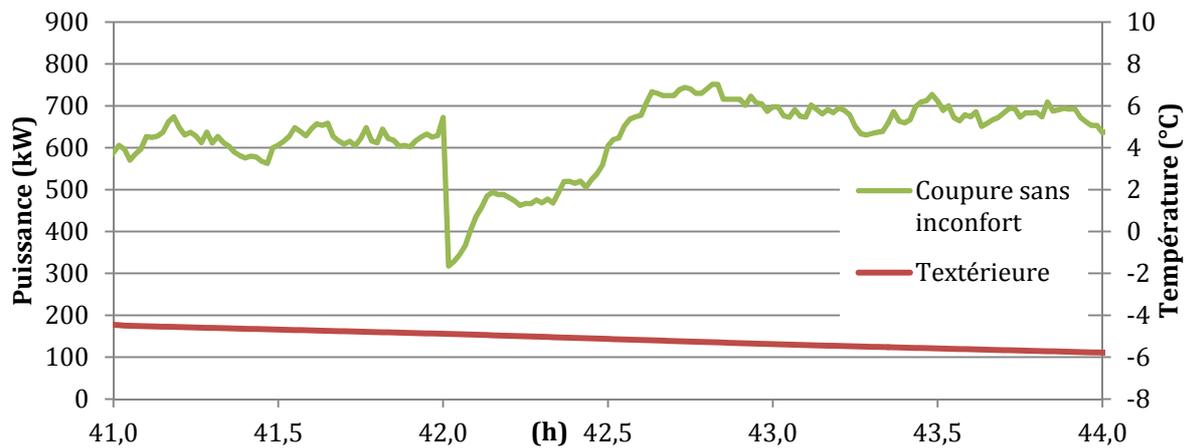


Figure 5-6- Effets sur la courbe de charge agrégée - Coupure sans inconfort

Comme on peut le voir sur la Figure 5-6, la coupure sans inconfort va permettre une réduction rapide de la puissance. Cependant, la puissance commencera aussi très tôt à augmenter, car pour les bâtiments moins inertes et avec plus de pertes thermiques, les temps de coupure sont très courts. La remontée en puissance se fait ainsi progressivement au fur et à mesure que les équipements de chauffage se rallument.

Pour les jours très froids, après environ 40 minutes, presque tous les chauffages de bâtiment sont éteints. Ainsi, à la fin de ces 40 minutes (pour cet exemple), la puissance du groupe de bâtiments devient stable.

Le fonctionnement des équipements de chauffage des différents bâtiments devient tellement foisonné qu'on n'observe pas de pics de puissance significatifs. Cependant, on observe une légère augmentation de la puissance appelée avant et après la coupure.

5.5. Coupure avec Préchauffage

L'objectif de cette stratégie est de charger les bâtiments en chaleur, pour que lors de la coupure l'inconfort soit réduit.

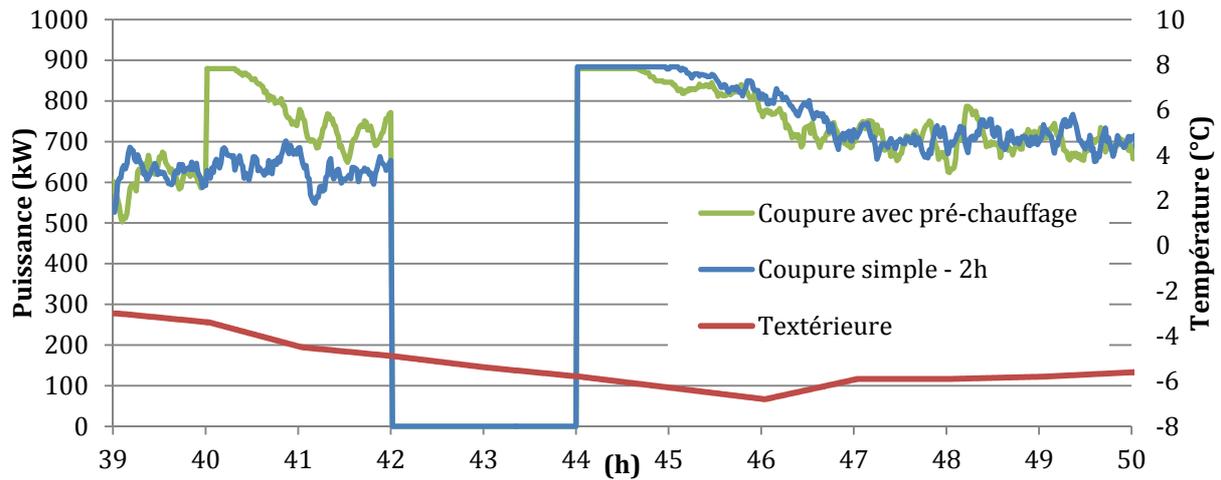


Figure 5-7 - effets sur la courbe de charge agrégée – Coupure avec préchauffage

La coupure avec préchauffage va créer deux pics de puissance. Le premier est dû à l'augmentation de la consigne lors du signal envoyé deux heures avant la coupure pour préchauffer les bâtiments. Le deuxième correspond au fonctionnement des équipements à pleine puissance après la coupure.

On observe cependant que le temps à pleine puissance après la coupure est réduit, ainsi que l'effet de recouvrement.

5.6. Passage en mode-éco

Une autre stratégie simulée a été la réduction de la consigne de 2 K pendant la période de contrôle (18-20h).

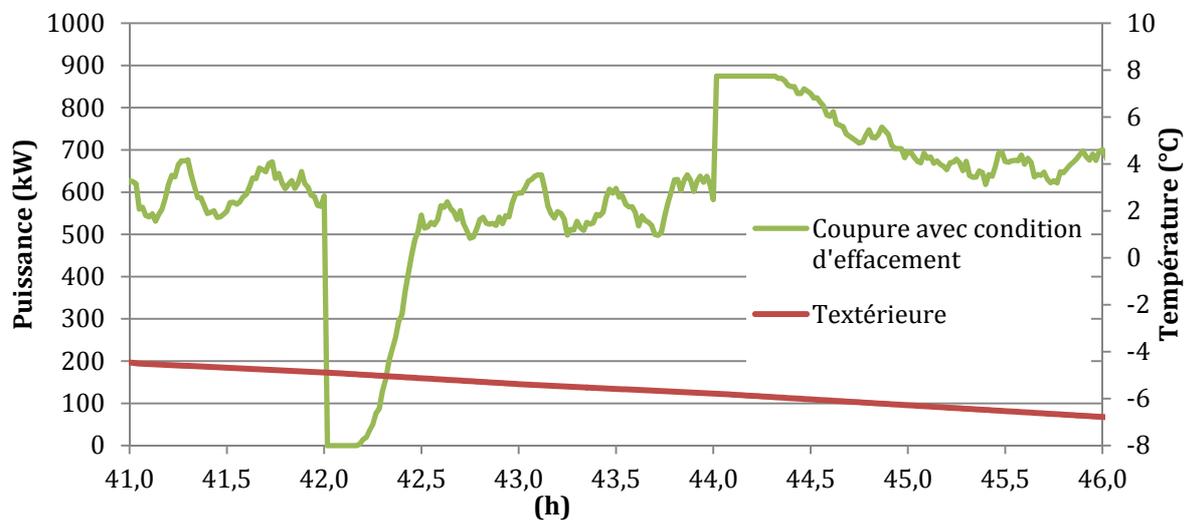


Figure 5-8 - Effets sur la courbe de charge agrégée – Passage en mode-éco

Au début du contrôle des chauffages il y a une réduction brusque de la puissance car il faut que la température de l'air descende de 2 K. Pendant cette période, les chauffages sont éteints. Comme la température va descendre plus ou moins vite en fonction du type de bâtiment, après environ 15 minutes, les chauffages des bâtiments moins inertes et avec plus de pertes vont se mettre en marche. Cet effet va créer une remontée de la température jusqu'au moment où tous les bâtiments

atteindront la température de consigne du mode-éco (-2 K). A partir de ce moment la puissance restera stable et légèrement inférieure à la puissance initiale.

Quand la consigne est mise à sa valeur initiale, un pic de puissance égal à la puissance nominale est créé.

5.7. Analyse des effets énergétiques

On va maintenant s'intéresser aux impacts énergétiques sur le groupe de 200 bâtiments. Dans cette analyse, on ne va pas prendre en compte la coupure avec arrêt de ventilation, car les effets énergétiques sont identiques à la coupure simple.

La figure suivante montre les impacts énergétiques pour les différentes stratégies.

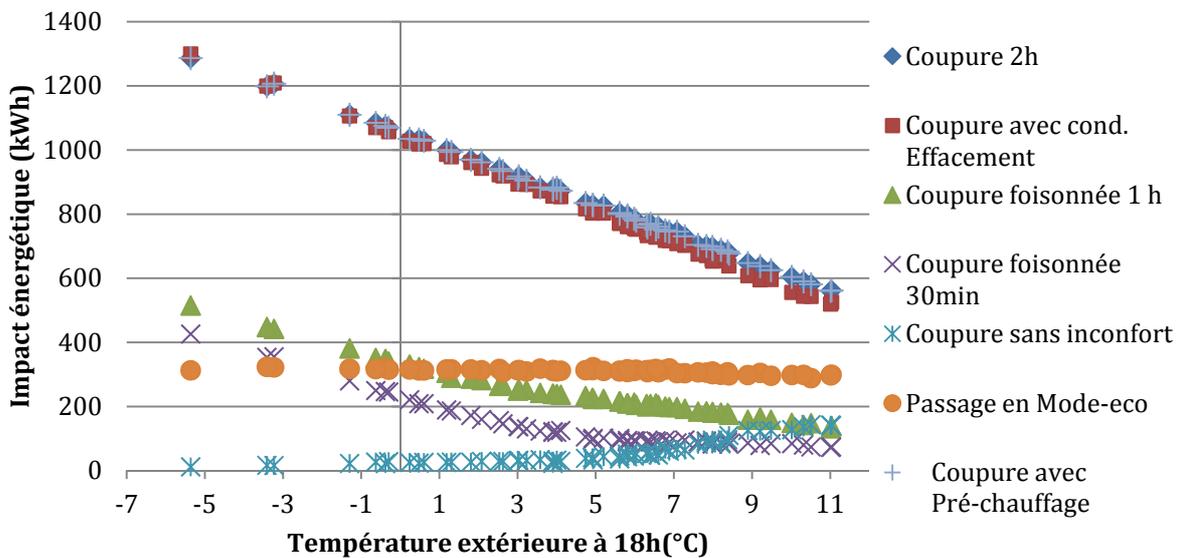


Figure 5-9 – Impact énergétique du groupe de bâtiments, pour les différentes stratégies de contrôle

L'impact énergétique de la coupure simple et de la coupure avec préchauffage sont identiques. On peut aussi voir que l'impact énergétique de la coupure avec condition d'effacement est légèrement inférieur à l'impact énergétique d'une coupure simple.

Le passage en mode-éco a un impact énergétique presque constant tout au long de la bande de température.

La coupure sans inconfort a un impact énergétique très faible par rapport aux autres stratégies. Cette coupure permet de comprendre la faible flexibilité du chauffage si des contraintes de confort sont appliquées.

Si une stratégie de foisonnement est appliquée, l'impact énergétique est réduit à plus de la moitié par rapport à la coupure simple.

La figure suivante montre la surconsommation en fonction de la température externe pour quatre stratégies de contrôle.

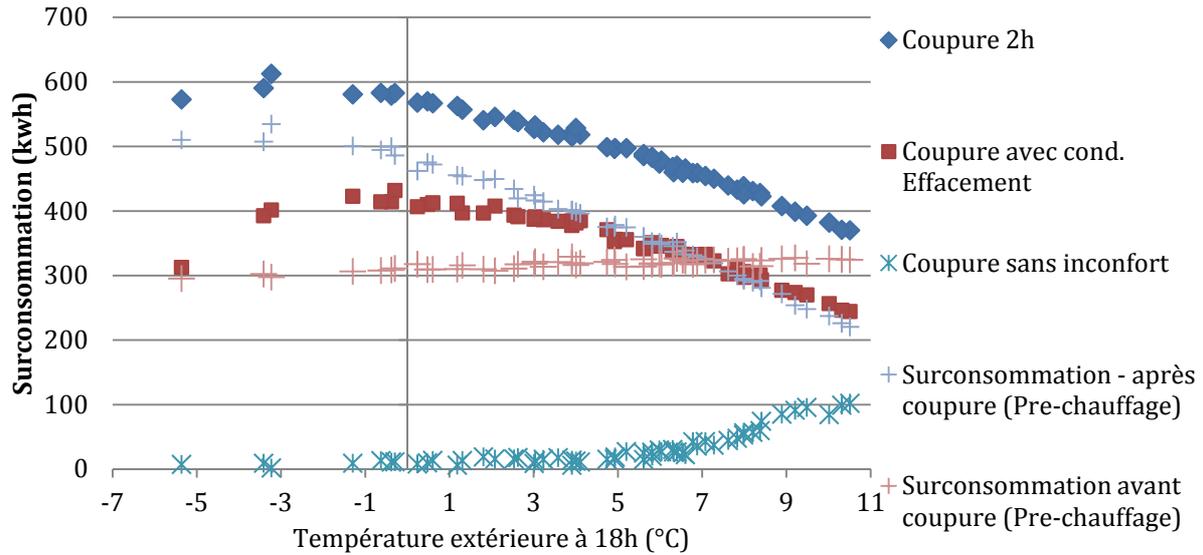


Figure 5-10 - Surconsommation du groupe de bâtiments, pour les différentes stratégies de contrôle

La Figure 5-10 montre que la stratégie avec condition d'effacement permet de réduire la surconsommation d'environ 100 kWh par rapport à la coupure simple.

La surconsommation pour la coupure sans inconfort suit la même évolution que l'impact énergétique. Pour des températures très faibles, la flexibilité des coupures deviennent minime car les valeurs de l'impact énergétique et de la surconsommation sont très réduites.

Le préchauffage va créer une surconsommation avant la coupure. Cette surconsommation se caractérise par un niveau de consommation presque constant. La surconsommation après la coupure avec cette stratégie est plus faible que la coupure simple car le bâtiment a été préchauffé et donc les bâtiments ont stocké de la chaleur.

La figure suivante montre la surconsommation pour les coupures avec foisonnement et pour la stratégie de passage en mode-éco.

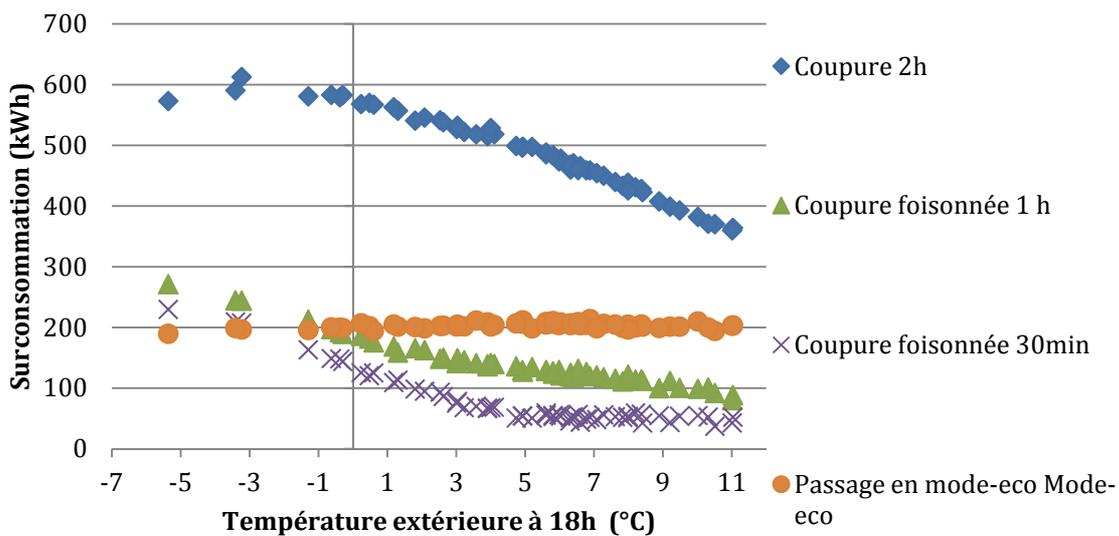


Figure 5-11 - Surconsommation du groupe de bâtiments – Coupure foisonnée et passage en mode-éco

La surconsommation pour les coupures avec foisonnement présente des valeurs beaucoup plus réduites que la coupure simple.

La surconsommation pour le mode-éco reste d'environ 100 kWh plus faible que l'impact énergétique. Cette surconsommation est presque constante pour toutes les températures.

A présent, on va analyser les puissances maximales appelées à la fin du temps de contrôle, donc à 20 heures. La figure suivante montre la puissance maximale appelée pour chaque stratégie en fonction de la température extérieure.

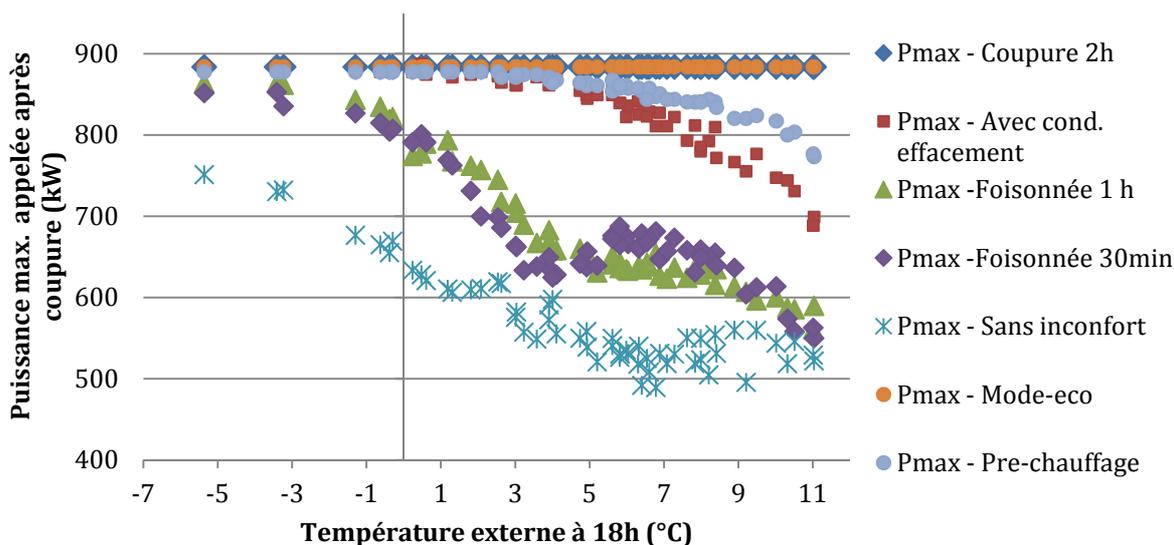


Figure 5-12 – Puissance maximales appelées en fonction de la température externe

Comme on peut en voir à partir de la Figure 5-12, la coupure simple et le passage en mode-éco vont créer un pic de consommation égal à la puissance nominale pour toute la gamme de températures extérieures. Ensuite, on observe la coupure avec préchauffage où à partir de 4°C la puissance nominale est atteinte.

La coupure avec condition d'effacement permet d'avoir des puissances maximales moins élevées que la coupure simple. Cependant, pour des températures extérieures inférieures à 3/4 °C la puissance nominale est atteinte après la coupure (avec un décalage).

Les puissances appelées pour les stratégies d'effacement avec foisonnement permettent des puissances plus réduites sauf pour des températures extérieures faibles.

La stratégie de coupure sans inconfort permet des puissances appelées après le signal d'effacement beaucoup plus faibles car chaque bâtiment a un temps de coupure différent et il n'y a donc pas de perte de foisonnement.

Ces simulations ont permis de comprendre les effets de l'application des stratégies sur un groupe de bâtiments. On a pu voir que les foisonnements des signaux de coupure permettent de réduire la consommation, tout en évitant les pics de puissance après la période de contrôle (sauf pour des températures extérieures très faibles).

Cependant, il faut savoir que sauf pour la stratégie de coupure sans inconfort, toutes les autres coupures vont affecter le confort thermique des occupants. C'est-à-dire que quelques consommateurs pourront déroger au signal de coupure du chauffage. D'avantages d'études devront ainsi être menées sur le confort thermique pour pouvoir prendre en compte ses effets dans les modèles de simulation du contrôle d'effacement.

5.8. Conclusion – Analyse de l'impact des stratégies de contrôle sur le réseau de distribution

Dans ce chapitre, on a analysé l'application des stratégies de contrôle à un groupe de bâtiments.

La coupure simple permet d'effacer complètement la puissance appelée pendant deux heures. Cependant, après la coupure il y a une perte de foisonnement des thermostats qui provoque des pics de puissance égaux à la puissance nominale du groupe de bâtiments étudiés.

On a pu déterminer qu'avec des stratégies de foisonnement l'impact énergétique sera réduit de plus de 50 % par rapport à la coupure simple. Les pics de consommation seront réduits, sauf pour des températures extérieures très faibles où la puissance du parc de bâtiments simulé atteint presque sa valeur nominale.

L'application de la coupure avec conditions d'effacement va permettre une réduction des pics de consommation après coupure, mais pour des températures extérieures plus inférieures à 4-3°C la puissance nominale du parc de bâtiments simulé est presque atteinte.

Si des coupures sont appliquées sans affecter le confort, les réductions de consommation sont très faibles, principalement quand les températures extérieures sont basses. Elles seront de plus en plus petites pour des températures extérieures basses.

Conclusion globale

Conclusion générale

Avec l'augmentation de la consommation électrique globale, on observe une plus forte augmentation des pics de puissance aux heures de pointe. Pour faire face à cette problématique, cette thèse analyse la flexibilité apportée par les différents usages électriques résidentiels sur la base de contrôles à distance ou de signaux de prix.

Dans un premier temps, nous avons analysé qualitativement le potentiel, pour le cas français, en nous basant sur la contribution de chaque usage à la consommation globale d'électricité et sur les heures d'utilisation de ces mêmes usages. En parallèle, nous avons fait une revue bibliographique des études existantes sur la gestion de la demande résidentielle.

Cette étude nous a permis de réaliser une synthèse de l'aptitude des différents équipements à la gestion de la demande, le chauffage électrique y apparaît comme l'usage ayant le plus grand potentiel.

Nous avons tout d'abord repéré les différentes stratégies de contrôle qui peuvent être appliquées au chauffage électrique. Pour cela, nous avons développé une méthodologie permettant de repérer les différentes stratégies de contrôle d'un équipement électrique quelconque de façon systématique, rapide et intuitive.

Pour le cas du chauffage électrique, nous avons repéré les stratégies de contrôle suivantes :

- Coupure simple
- Coupure avec arrêt de ventilation
- Coupure avec condition de bande morte
- Coupure avec préchauffage
- Passage en mode-éco

Nous avons aussi réalisé une analyse des principaux modèles existants de simulation dynamique du bâtiment. Cependant nous avons conclu que ces modèles ne sont pas adaptés à nos besoins, à cause du faible pas de temps utilisé dans l'étude de contrôle-commande des appareils CVC (Chauffage Ventilation Climatisation).

Le fonctionnement du chauffage électrique étant intrinsèquement associé à la dynamique du bâtiment, nous avons développé un modèle physique du bâtiment + chauffage apte à étudier, à faibles pas de temps, le comportement de ces équipements pendant leur fonctionnement normal et quand des stratégies de contrôle sont employées.

Ce modèle de simulation du bâtiment + chauffage construit sur des différences finies utilise la technique de Moore pour être réduit et gagner en temps de calcul [Moore, 1981]. Ce modèle nous a permis de réaliser des simulations avec des temps de simulation courts, tout en préservant la qualité des résultats.

Pour nous permettre d'évaluer l'inconfort thermique généré par les contrôles du chauffage, des contraintes de confort thermique ont été établies selon les normes de confort EN 7730 et EN 15251.

Une fois modèle de simulation créé, nous avons fait une analyse détaillée des différentes stratégies de contrôle repérées auparavant, en analysant notamment les impacts énergétiques et les impacts sur le confort des occupants.

A cause de la réduction de la consommation, nous avons un taux de recouvrement en moyenne de 70 % dans le cas d'une coupure simple (coupure de l'alimentation). Cependant, cette valeur décroît pour des températures extérieures faibles.

Nous avons aussi étudié la limite de faisabilité d'une coupure sans inconfort. Nous avons pu voir que les bâtiments construits avant 75 ne permettent pas la coupure sans affecter le confort pour des différences de température supérieures à 18 °C. Cependant, pour les bâtiments de type Appartement (à cause de leur plus grande inertie), des coupures sont possibles pendant environ 30 minutes : ceci est valable sur toute la plage de températures extérieures, et quelle que soit la période de construction.

L'arrêt simultané de la ventilation mécanique et du chauffage permet de réduire le temps hors confort pour les bâtiments de type Appartement entre 10 et 33 %. Pour les bâtiments type Maison individuelle cette réduction est seulement visible pour les bâtiments construits depuis l'année 2000.

Les coupures avec condition de bande morte permettent une légère amélioration des conditions de confort, mais l'impact est très dépendant de l'inertie de la pièce (meubles). La stratégie de passage en mode-éco a un impact environ 50 % plus faible que la coupure simple, mais l'impact sur le confort est grandement réduit.

A partir d'une analyse de sensibilité nous avons pu déterminer quels paramètres permettent à un logement d'être plus performant en matière d'effacement électrique. Les paramètres qui nous ont semblé les plus importants sont :

- i. L'isolation des parois externes par l'extérieur - Augmentation du temps de coupure entre 120 et 170 % par rapport au bâtiment de référence.
- ii. L'épaisseur des parois internes - Augmentation du temps de coupure entre 115 et 170 % par rapport au bâtiment de référence.
- iii. L'inertie importante du nœud d'air ($40 \times C_{\text{air}}$) - Augmentation du temps de coupure d'environ 75 % par rapport au bâtiment de référence.

Les autres paramètres permettent des augmentations inférieures à 15 %.

Dans notre analyse, nous avons aussi considéré les gains monétaires engendrés par les différentes stratégies, pour quatre types de tarifications. La stratégie qui permet les économies les plus importantes tout en assurant un impact plus faible sur le confort est la stratégie de passage en mode-éco. Des économies entre 10 et 15 € par mois (ou en moyenne 0,33 ou 0,5 € par contrôle) peuvent être obtenues avec l'application de cette stratégie et une tarification de type « *Critical peak pricing* ». Cette tarification peut permettre une véritable incitation à la réduction de la consommation à cause des prix élevés pendant les pointes électriques.

La tarification « *Real time pricing* » présente des valeurs différentes tous les jours, et du fait de cette complexité on peut envisager des contrôles optimisés.

Finalement, nous avons analysé les impacts des différentes stratégies pour un réseau de distribution. Dans cette analyse, la coupure simple permet d'effacer complètement la puissance appelée pendant deux heures. Cependant, après la coupure il ya une perte de foisonnement provoquent des pics de puissance égaux à la puissance nominale du groupe de bâtiments étudiés.

Nous avons pu déterminer qu'avec des stratégies de foisonnement l'impact énergétique est réduit de plus de 50 % par rapport à la coupure simple. Les pics de consommation sont réduits, sauf pour des températures extérieures très faibles pour lesquelles la puissance du parc de bâtiments simulé atteint presque sa valeur nominale.

L'application de la coupure avec conditions de bande morte permet une réduction des pics après coupure. Mais pour des températures extérieures inférieures à 4-3°C, la puissance nominale du parc de bâtiments simulé est presque atteinte.

Si des coupures sont appliquées sans affecter le confort, les réductions de consommation sont très petites car le parc de bâtiments simulés est constitué principalement de bâtiments anciens (40 % des bâtiments simulés correspondent à des constructions d'avant 75). Leur temps de coupure sans affecter le confort est en générale très faible.

Nous pouvons aussi conclure que chaque stratégie a des avantages et des inconvénients et que l'application d'une stratégie spécifique au détriment d'une autre va dépendre largement de l'objectif primaire du choix d'une stratégie de contrôle.

Éléments de perspective

Données bâtiment

Au cours de nos travaux, nous avons considéré des valeurs moyennes pour les différentes périodes de construction des logements français car nos modèles n'ont pu être calibrés, faute de disposer de données d'expérimentations terrain.

Selon leur zone d'implantation géographique, les bâtiments peuvent avoir des caractéristiques très différentes en termes de géométrie, d'inertie ou d'isolation selon leur géographie et leur période de construction. Aussi, des bases de données détaillées sur les bâtiments raccordés à un réseau de distribution permettraient de représenter le parc de bâtiments avec plus de précision.

Evaluation du confort thermique en régime dynamique

Dans nos travaux, nous avons évalué l'inconfort des différentes stratégies de contrôle du chauffage électrique en nous basant sur des contraintes de confort qui, dans la plupart des cas, ne peuvent pas être complètement valables à cause de plusieurs facteurs :

- La vitesse à laquelle la température chute après la coupure du chauffage devient trop importante et ainsi les conditions de confort retenues dans nos travaux peuvent être erronées.
- Les habitudes vestimentaires ne sont pas prises en compte, ni l'activité des occupants.

De ce fait, des études devront être menées sur l'évaluation du confort en régime dynamique pour pouvoir déterminer avec plus de précision les impacts de chaque stratégie de contrôle.

Un autre moyen d'analyser les impacts sur le confort consiste à passer par des expériences à grande échelle. Ceci permettrait de connaître l'acceptabilité des différentes stratégies de contrôle à travers la dérogation de ceux ci ou à travers des entretiens avec les occupants par questionnaires.

Profil d'occupation

Dans la présente thèse, nous avons considéré un profil de température de consigne fixe. Pourtant des profils de chauffages intermittents sont souvent employés lors des absences des occupants. Une connaissance plus approfondie des profils d'occupation permettrait une évaluation plus précise des impacts des stratégies de contrôle, mais aussi de la flexibilité de ces contrôles. Dans le cas d'une coupure réalisée en l'absence des occupants, la question de l'inconfort ne se pose pas et donc le temps de coupure peut être augmenté.

Une solution possible est de passer par l'utilisation de systèmes de télésurveillance pour de déterminer les habitudes des occupants de chaque maison. Une autre solution est d'utiliser les données des relevés des compteurs intelligents.

Optimisation

Dans un premier temps, le présent modèle de simulation pourra être utilisé pour étudier le développement de méthodologies d'optimisation du contrôle des équipements électriques.

Dans nos travaux nous avons étudié le contrôle du chauffage électrique dans le cas des contrôles à distance et/ou des incitations à réduire la consommation via des signaux de prix d'électricité. Cependant comme nous l'avons vu, l'optimisation du fonctionnement des différents équipements en fonction des tarifs, comme le « *Real time pricing* », peut permettre aux consommateurs de profiter au maximum des tarifs proposés. Si les tarifs reflètent bien le fonctionnement du réseau électrique, les optimisations locales permettront de réduire les pics de consommation et d'aplatir la courbe de charge (dans le cas théorique où tous les logements ont de tels contrôles).

D'autres types de contrôle peuvent être encore étudiés comme le couplage entre consommation électrique et production par énergies renouvelables.

Etudes coût-bénéfice

Des études devront être menées sur la base d'expérimentations à grande échelle pour déterminer le coût-bénéfice engendré par l'application du contrôle à distance mais aussi dans les cas d'une optimisation de la consommation au niveau du bâtiment. Les expérimentations permettront de prendre en compte non seulement le coût d'exploitation de gestion des équipements mais aussi leur installation et les bénéfices associés avec la gestion de la demande.

References

- [ash, 1997]1997. *ASHRAE HANDBOOK - FUNDAMENTALS*. American society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning.
- [gra, 2002] 2002. *EN 60848, langage de spécification GRAFCET pour diagrammes fonctionnels en séquence*.
- [en1, 2004]2004. *EN 12831, Méthode de calcul des déperditions calorifiques de base*.
- [en7, 2006]2006. *EN 7730, Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local*.
- [ene, 2006]2006. *Manual EnergyPlus*. U.S department of Energy.
- [en1, 2007]2007. *EN 15251, 2007, Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité d'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique*.
- [ADEME, 2009]ADEME. 2009. *Les chiffres clés du bâtiment*. Tech. rept. ADEME - Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Energie.
- [ADEME, 2011]ADEME. 2011. *Réglementation thermique 2012*.
- [Agneholm & J.Daalder, 2000]Agneholm, E., & J.Daalder. 2000. Cold load pick-up of residential load. *IEE proceedings - Generation, transmission and Distribution*, **147**.
- [Albadi & El-Saadany, 2008]Albadi, M.H., & El-Saadany, E.F. 2008. A summary of demand response in electricity markets. *Electric power systems Research*, **78**, 1989–1996.
- [Ari Rabl, 1994]Ari Rabl, Jan F.Kreider. 1994. *Heating and cooling of buildings*. Mc Graw Hill.
- [Artmann & Manz, 2007]Artmann, N., & Manz, H. 2007. Parametric study on the dynamic heat storage capacity of building elements. In: *2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and 75 Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century*.
- [Bertoldi & Atanasiu, 2007]Bertoldi, Paolo, & Atanasiu, Bogdan. 2007. *Electricity Consumption and Efficiency Trends in the Enlarged European Union*. Tech. rept. Institute for Environmet and Sustainability.
- [Booch et al., 1998] Booch, Grady, Rumbaugh, James, & Jacobson, Ivar. 1998. *Le guide de l'utilisateur uml*.
- [Braun, 2003]Braun, James E. 2003. Load Control using building thermal mass. *ASHRAE Transactions*, **125**, 292–301.
- [Braun & Chaturvedi, 2002]Braun, James E., & Chaturvedi, Nitin. 2002. An Inverse gray-box model for transient building load prediction. *HVAC&R Research*, **8**(1), 73–99.
- [Braun et al., 2001]Braun, James E., Montgomery, Kent W., & Chaturvedi, Nitin. 2001. Evaluation the performance of building thermal mass control strategies. *HVAC&R Research*, **7**, 403–428.
- [Brenier, 2004]Brenier, Henri. 2004. *Spécifications fonctionnelles: Génération automatique de code*. Techniques de l'ingénieur.
- [Bézian et al., 1997]Bézian, Jean-Jacques, Barles, Pierre, Claude, François, & Inard, Christian. 1997. *Les émetteurs de chaleur*. Presses de l'école des Mines.

- [Charron & Athienitis, 2007]Charron, Rémi, & Athienitis, Andreas. 2007. Verification of a low energy solar home model to be used with a GA optimisation tool. *CanmetEnergy*.
- [Coley & Penman, 1992]Coley, D.A., & Penman, J.M. 1992. Second order suystem identification in the thermal response of real buildings. Paper II: Recursive formulation for on-line building energy management and control. *Building and Environment*, **27**(3), 269–277.
- [Commission, 2008]Commission, European. 2008. Commission Regulation (EC) No 1275/2008 of 17 December 2008 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for standby and off mode electric power consumption of electrical and electronic household and office equipment. *Official Journal L339*, **L339**, 01–08.
- [Da Silva *et al.*, 2010]Da Silva, David, Brancaccio, Massimo, Duplessis, Bruno, & Adnot, Jérôme. 2010. Room air conditioner load control under summer comfort constraint. *Third international conference Palenc*.
- [Da_Silva & Rivière, 2010]Da_Silva, David, & Rivière, Philippe. 2010. *Field measurement and awareness survey in shops and stores of new equipment*, WP3 D3.1. Tech. rept. Report elaborated for the EC, <http://www.selina-project.eu>.
- [Da_Silva *et al.*, 2011a]Da_Silva, David, Duplessis, Bruno, & ADNOT, Jérôme. 2011a. Graphical language for identification of control strategies allowing Demand Response. *In: EEDAL*.
- [Da_Silva *et al.*, 2011b]Da_Silva, David, Duplessis, Bruno, & Adnott, Jérôme. 2011b. A methodology for evaluationg the energy, peak load and comfort effects of demand response control strategies for electric heating. *In: ECEEE*.
- [Dehausse *et al.*, 1988]Dehausse, R., Gilbert, Achard, bacot Patrick, & Brigitte, Berges. 1988. *Energétique des bâtiments, Tome II - Calcul des enveloppes*.
- [Déqué *et al.*, 1997]Déqué, Francis, Delille, Sylvie, & Dautin, Sophie. 1997. Réduction d'un système linéaire et invariant par la technique de Moore. Application à la thermique du bâtiment. *Revue Générale de Thermique*, **36**, 170–179.
- [Duméry, 2007]Duméry, Jean-Jacques. 2007. Grafcet - Concepts de base. Techniques de l'ingénieur.
- [EDF, 2005]EDF. 2005. *30 ans de chauffage électrique: histoire d'une innovation mouvementée*. Tech. rept. EDF, Institut de l'Entreprise, and Ministère Education Nationale Enseignement Supérieur et Recherche.
- [Ericson, 2009]Ericson, T. 2009. Direct load control of residential water heaters. *Energy Policy*, **37**, 3502–3512.
- [Escriva *et al.*, 2009]Escriva, G., Marrec, A., Ortega, M.Alcázar, Salazar, I Valencia, & C.Alvarez-Bel. 2009. Evaluation of control strategies in HVAC split systems. *In: Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE), 2009 IEEE PES/IAS*.
- [EuPLot13, 2007]EuPLot13. 2007. *Preparatory studies for Eco-Design requirements of EuPs Lot 13: Domestic refrigerators & Freezers*. Tech. rept.
- [EuPLot14, 2007]EuPLot14. 2007. *Preparatory studies for Eco-Design requirements of EuPs Lot 14 : Domestic Dishwashers and wachining machines*. Tech. rept.
- [EuPLot16, 2009]EuPLot16. 2009. *Preparatory studies for Eco-Design requirements of EuPs Lot 16 : Laundry Dryers*. Tech. rept.

- [EuPLOT6, 2006]EuPLOT6. 2006. *Eco-Design Lot 6 : Standby and off-mode Losses*. Tech. rept.
- [Faruqui & Hledik, 2007]Faruqui, Ahmad, & Hledik, Ryan. 2007. *The state of Demand Response in California*. Tech. rept. California Energy Commission.
- [Formby, 2007]Formby, Richard. 2007. *Task XI : Time of use pricing and energy use for demand management delivery*. Tech. rept. IEADSM.
- [Fraisie *et al.*, 2002]Fraisie, Gilles, Viardot, Christelle, Lafabrie, Olivier, & gilbert Achard. 2002. Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy. *Energy and buildings*, **34**, 1017–1031.
- [Fromby, 2007]Fromby, Richard. 2007. *Task Xi: Time of use pricing and energy use for demand management delivery*. Tech. rept. IEA - international energy agency.
- [GEA, 1995a]GEA. 1995a. *Long-term efficiency targets, technical and economical analyses – Washing machines, driers and dishwashers*. Tech. rept. Volume 3. Group for efficient appliances, EnR – working group.
- [GEA, 1995b]GEA. 1995b. *Volume III - Long-term efficiency targets, technical and economic analyses; Washing machines, Driers and Dishwashers - background reports*. Tech. rept. Group for Efficient Appliances.
- [Giroux, 2004]Giroux, Patrick. 2004. Langage UML: développement de logiciel et modélisation visuelle. *In: Techniques de l'ingénieur*.
- [Gouda *et al.*, 2002]Gouda, M.M., Danaher, S., & Underwood, C.P. 2002. Building thermal model reduction using nonlinear constrained optimization. *Building and Environment*, **37**, 1255–1265.
- [Grinden & Feilberg, 2008]Grinden, Bjørn, & Feilberg, Nicolai. 2008. *REMODECE D-10, Residential Monitoring to Decrease Energy Use and Carbon Emissions in Europe Intelligent Energy*. Tech. rept. Intelligent Energy – Europe (IEE).
- [H. Recknagel, 2005] H. Recknagel, E. Sprenger, E.-R.Schramek. 2005. *Génie Climatique*. Dunod.
- [Hoffer & Charton, 2011]Hoffer, Alexandre, & Charton, Nicolas. 2011. *Marché de capacité : éclairage sur 7 paramètres clés du futur mécanisme français*. Tech. rept. E-Cube Strategy consultants.
- [Jongejan *et al.*, 2010]Jongejan, Arie, Katzman, Brian, Leahy, Thomas, & Michelin, Mark. 2010. *Dynamic Pricing Tariffs for DTE's Residential Electricity Customers*. Tech. rept. Center for Sustainable systems - university of michigan.
- [Katipamula & Lu, 2006]Katipamula, Srinivas, & Lu, Ning. 2006. Evaluation of Residential HVAC Control Strategies for Demand Response programs. *ASHRAE Transactions*.
- [KEMA, 2006]KEMA. 2006. *2005 Smart Thermostat program impact evaluation*. Tech. rept. prepared for San Diego Gas & Electric company.
- [Kummert, 2001]Kummert, Michaël. 2001. *Contribution to the application of modern control techniques to solar buildings*. Ph.D. thesis, Fondation Universitaire Luxembourgeoise.
- [Lee & Braun, 2008a]Lee, Kyoung-Ho, & Braun, James E. 2008a. Development of methods for determining demand-limiting setpoint trajectories in buildings using short-term measurements. *Building and Environment*, **43**, 1755–1768.

- [Lee & Braun, 2008b]Lee, Kyoung-Ho, & Braun, James E. 2008b. Evaluation of methods for determining demand-limiting setpoint trajectories in buildings using short-term measurements. *Building and Environment*.
- [Lee & Braun, 2008c]Lee, Kyoung-Ho, & Braun, James E. 2008c. Model-based demand-limiting control of building thermal mass. *Building and Environment*, **43** (2008), 1633–1646.
- [Lu & Katipamula, 2005]Lu, Ning, & Katipamula, Srinivas. 2005. Control strategies of thermostatically controlled appliances in a competitive electricity market. *IEEE*.
- [Mendes *et al.*, 2001]Mendes, Nathan, Oliveira, Gustavo H.C., & de Araujo, Humberto X. 2001. Building thermal performance analysis by using MATLAB/SIMULINK. *Seventh international IBPSA Conference - Rio de Janeiro, Brazil*.
- [Mert, 2008]Mert, W. 2008. *Consumer acceptance of smart appliances*. Tech. rept. IEE – Smart A project, D 5.5 of WP 5.
- [Meteotest, 2006] Meteotest. 2006. *Meteonorm dataset*. Logiciel.
- [Moore, 1981]Moore, Bruce C. 1981. Principal component analysis in linear systems: Controllability, Observability and model reduction. *IEEE transactions on automatic control*, **26**, 17–32.
- [Moreno & Peulot, 1996]Moreno, S., & Peulot, E. 1996. *Le Grafset - Conception, Implantation dans les Automates Programmables Industriels*. Educavivres.
- [Morris *et al.*, 1994]Morris, F.B, Braun, J.E., & Treado, S.J. 1994. Experimental and simulated performance of optimal control of building thermal storage. *ASHRAE Transactions*, **100**, 402–414.
- [Nemry & Uihlein, 2008]Nemry, Françoise, & Uihlein, Andreas. 2008. *Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings (IMPRO-Building)*. Tech. rept. JRC - European Commission.
- [Newborough & Augood, 1999]Newborough, M, & Augood, P. 1999. Demand side management opportunities for the UK domestic sector. *IEE proceedings*, **14**(3).
- [ORPHELIN, 1999]ORPHELIN, Matthieu. 1999 (May). *Méthodes pour la reconstitution de courbes de charge agrégées des usages thermiques de l'électricité*. Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [Orphelin & Adnot, 1999]Orphelin, Matthieu, & Adnot, Jerome. 1999. Improvement of Methods for Reconstructing Water Heating Aggregated Load Curves and Evaluating Demand-Side Control Benefits. *IEEE transactions*, **14**, 1549–1555.
- [Piette *et al.*, 2007]Piette, M.A., Watson, D., Motegi, N., & Kiliccote, S. 2007. *Automated critical peak pricing field tests: 2006 pilot program description and results*. Tech. rept. Ernest Orlando Lawrence Berkeley national laboratory.
- [Poignant & Sido, 2010]Poignant, Serge, & Sido, Bruno. 2010. *Groupe de travail sur la maîtrise de la pointe électrique*. Tech. rept.
- [Rabenstein, 1994]Rabenstein, R. 1994. Application of model reduction techniques to building energy simulation. *Solar Energy*, **53**(3), 289–299.
- [Reddy *et al.*, 1991]Reddy, T.A., NoRFoRD, L. K., & KEMPTON, W. 1991. Shaving residential air-conditioner electricity peaks by intelligent use of the building thermal mass. *Energy*, **16**(7), 1001–1010.
- [Réseau de transport d'électricité, 2011a]Réseau de transport d'électricité, RTE. 2011a. *EcoWatt Bretagne*.

- [Réseau de transport d'électricité, 2011b]Réseau de transport d'électricité, RTE. 2011b. *EcoWatt-provence-Azur*.
- [RTE, 2011]RTE, Réseau de transport d'électricité. 2011. *Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France*. Tech. rept. Réseau de transport d'électricité.
- [Savery & Lee, 1996]Savery, C. William, & Lee, James B. 1996. A Simulation model of electrically heated residences validated with field data. *ASHRAE Transactions*, **102**.
- [Seem, 1987]Seem, John Ervin. 1987. *Modeling of heat transfer in buildings*. Ph.D. thesis, University of Wisconsin-Madison.
- [Solar Energy Laboratory, 2000]Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin. 2000. *TRNSYS (A TRAnsient Systems Simulation Program) 16 with Isibat*.
- [Stadler, 2008]Stadler, Ingo. 2008. Power grid balancing of energy systems with high renewable energy penetration by demand response.pdf. *Utilities Policy*, **16**, 90–98.
- [Stadler *et al.*, 2009]Stadler, M, Krause, Wolfram, Sonnenschein, Michale, & Vogel, Ute. 2009. Modelling and evaluation of control schemes for enhancing load shift of electricity demand for cooling devices. *Environment Modelling & Software*, **24**, 285–295.
- [Stamminger, 2009]Stamminger, Rainer. 2009. *Synergetic potential of smart appliances*. Tech. rept. IEE – Smart A project, D 2.3 of WP 2.
- [Steinman *et al.*, 1989]Steinman, M., Kalisperis, L.N., & Summers, L.H. 1989. The MRT-Correction Method: A new method of radiant heat exchange. *ASHRAE Transactions*, **95**, 1015–1027.
- [Stephenson & Mitalas, 1974]Stephenson, D.G., & Mitalas, G.P. 1974. Calculation of heat conduction transfer functions for multi-layer Slabs. *ASHRAE Transactions*, **77**, 117–126.
- [Strbac, 2008] Strbac, Goran. 2008. Demand side management: Benefits and challenges. *Energy policy*.
- [Taylor *et al.*, 1991]Taylor, Russell D., Pedersen, Curtis O., Fisher, Dan, & Liesen, Richard. 1991. Impact of simultaneous simulation of buildings and mechanical systems in heat balance based energy analysis programs on system response and control. *In: IBPSA*.
- [Traisnel, 2001]Traisnel, Jean-Pierre. 2001. *Habitat et développement durable - bilan rétrospectif et prospectif*. Tech. rept. Club d'Ingénierie prospective Energie et Environnement (CLIP).
- [U.S._Department_of_Energy, 2006]U.S._Department_of_Energy. 2006. *Benefits of demand Response in electricity markets and recommendations for achieving them*. Tech. rept. A report to the United States Congress pursuant to Section 1252 of the energy policy act of 2005.
- [Wang & Xu, 2006]Wang, Shengwei, & Xu, Xinhua. 2006. Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification. *International journal of Thermal Sciences*, **45**, 419–432.
- [Wood & Newborough, 2006]Wood, G, & Newborough, M. 2006. Influencing user behaviour with energy information display systems for intelligent homes. *International Journal of Energy Research*, **31**, 56–78.
- [Zhou *et al.*, 2005]Zhou, Guo, Krarti, Moncef, & Henze, Gregor P. 2005. Parametric Analysis of Active and passive Building Thermal Storage Utilization. *Solar Energy Engineering*, **127**, 37–46.

- [Nemry & Uihlein, 2008]Nemry, Françoise, & Uihlein, Andreas. 2008. *Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings (IMPRO-Building)*. Tech. rept. JRC - European Commission.
- [Newborough & Augood, 1999]Newborough, M, & Augood, P. 1999. Demand side management opportunities for the UK domestic sector. *IEE proceedings*, **14**(3).
- [Orphelin & Adnot, 1999]Orphelin, Matthieu, & Adnot, Jerome. 1999. Improvement of Methods for Reconstructing Water Heating Aggregated Load Curves and Evaluating Demand-Side Control Benefits. *IEEE transactions*, **14**, 1549–1555.
- [ORPHELIN, 1999]ORPHELIN, Matthieu. 1999 (May). *Méthodes pour la reconstitution de courbes de charge agrégées des usages thermiques de l'électricité*. Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [Piette *et al.*, 2007]Piette, M.A., Watson, D., Motegi, N., & Kiliccote, S. 2007. *Automated critical peak pricing field tests: 2006 pilot program description and results*. Tech. rept. Ernest Orlando Lawrence Berkeley national laboratory.
- [Poignant & Sido, 2010]Poignant, Serge, & Sido, Bruno. 2010. *Groupe de travail sur la maîtrise de la pointe électrique*. Tech. rept.
- [Rabenstein, 1994]Rabenstein, R. 1994. Application of model reduction techniques to building energy simulation. *Solar Energy*, **53**(3), 289–299.
- [Reddy *et al.*, 1991]Reddy, T.A., NoRFoRD, L. K., & KEMPTON, W. 1991. Shaving residential air-conditioner electricity peaks by intelligent use of the building thermal mass. *Energy*, **16**(7), 1001–1010.
- [Réseau de transport d'électricité, 2011a]Réseau de transport d'électricité, RTE. 2011a. *EcoWatt Bretagne*.
- [Réseau de transport d'électricité, 2011b]Réseau de transport d'électricité, RTE. 2011b. *EcoWatt-provence-Azur*.
- [RTE, 2011]RTE, Réseau de transport d'électricité. 2011. *Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France*. Tech. rept. Réseau de transport d'électricité.
- [Savery & Lee, 1996]Savery, C. William, & Lee, James B. 1996. A Simulation model of electrically heated residences validated with field data. *ASHRAE Transactions*, **102**.
- [Seem, 1987]Seem, John Ervin. 1987. *Modeling of heat transfer in buildings*. Ph.D. thesis, University of Wisconsin-Madison.
- [Solar Energy Laboratory, 2000]Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin. 2000. *TRNSYS (A TRAnsient SYstems Simulation Program) 16 with Isibat*.
- [Stadler *et al.*, 2009]Stadler, M, Krause, Wolfram, Sonnenschein, Michale, & Vogel, Ute. 2009. Modelling and evaluation of control schemes for enhancing load shift of electricity demand for cooling devices. *Environment Modelling & Software*, **24**, 285–295.
- [Stadler, 2008]Stadler, Ingo. 2008. Power grid balancing of energy systems with high renewable energy penetration by demand response.pdf. *Utilities Policy*, **16**, 90–98.
- [Stamminger, 2009]Stamminger, Rainer. 2009. *Synergetic potential of smart appliances*. Tech. rept. IEE – Smart A project, D 2.3 of WP 2.
- [Steinman *et al.*, 1989]Steinman, M., Kalisperis, L.N., & Summers, L.H. 1989. The MRT-Correction Method: A new method of radiant heat exchange. *ASHRAE Transactions*, **95**, 1015–1027.

- [Stephenson & Mitalas, 1974]Stephenson, D.G., & Mitalas, G.P. 1974. Calculation of heat conduction transfer functions for multi-layer Slabs. *ASHRAE Transactions*, **77**, 117–126.
- [Strbac, 2008] Strbac, Goran. 2008. Demand side management: Benefits and challenges. *Energy policy*.
- [Taylor *et al.*, 1991]Taylor, Russell D., Pedersen, Curtis O., Fisher, Dan, & Liesen, Richard. 1991. Impact of simultaneous simulation of buildings and mechanical systems in heat balance based energy analysis programs on system response and control. *In: IBPSA*.
- [Traisnel, 2001]Traisnel, Jean-Pierre. 2001. *Habitat et développement durable - bilan rétrospectif et prospectif*. Tech. rept. Club d'Ingénierie prospective Energie et Environnement (CLIP).
- [U.S._Department_of_Energy, 2006]U.S._Department_of_Energy. 2006. *Benefits of demand Response in electricity markets and recommendations for achieving them*. Tech. rept. A report to the United States Congress pursuant to Section 1252 of the energy policy act of 2005.
- [Wang & Xu, 2006]Wang, Shengwei, & Xu, Xinhua. 2006. Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification. *International journal of Thermal Sciences*, **45**, 419–432.
- [Wood & Newborough, 2006]Wood, G, & Newborough, M. 2006. Influencing user behaviour with energy information display systems for intelligent homes. *International Journal of Energy Research*, **31**, 56–78.
- [Zhou *et al.*, 2005]Zhou, Guo, Krarti, Moncef, & Henze, Gregor P. 2005. Parametric Analysis of Active and passive Building Thermal Storage Utilization. *Solar Energy Engineering*, **127**, 37–46.

ANNEXE I - Méthodes simplifiées pour le calcul des évolutions de température infra-horaires

Le logiciel TRNSYS reste toute de même précis pour des calculs de consommation [Taylor et al., 1991]. Avec l'objectif d'évaluer des effacements du chauffage électrique seulement en termes de consommation, on a étudié la possibilité d'un couplage de TRNSYS avec un modèle pour décrire l'évolution de température opérative intérieure pour des pas de temps infra-horaires. On a aussi étudié la possibilité d'usage de ce modèle comme un outil pour déterminé l'inconfort lors d'une coupure du chauffage électrique.

Premièrement on a observe les évolutions de température des murs et de l'air à partir de simulations sur TRNSYS. Même si ses simulations présentent un effet en escalier du au faible pas de temps de simulation utilisée, elles permettent de toute même de comprendre les différents interactions existants lors d'une coupure du chauffage. De plus les températures calculées par TRNSYS restent valables aux pas de temps δ (dans notre cas entre 30 minutes).

Dans ces simulations on a chauffé le bâtiment pendant toute une journée à 22 °C avec une température extérieure constante est égal à 0 °C. La figure suivante montre l'évolution de la température des murs et de l'air lors de la coupure du chauffage.

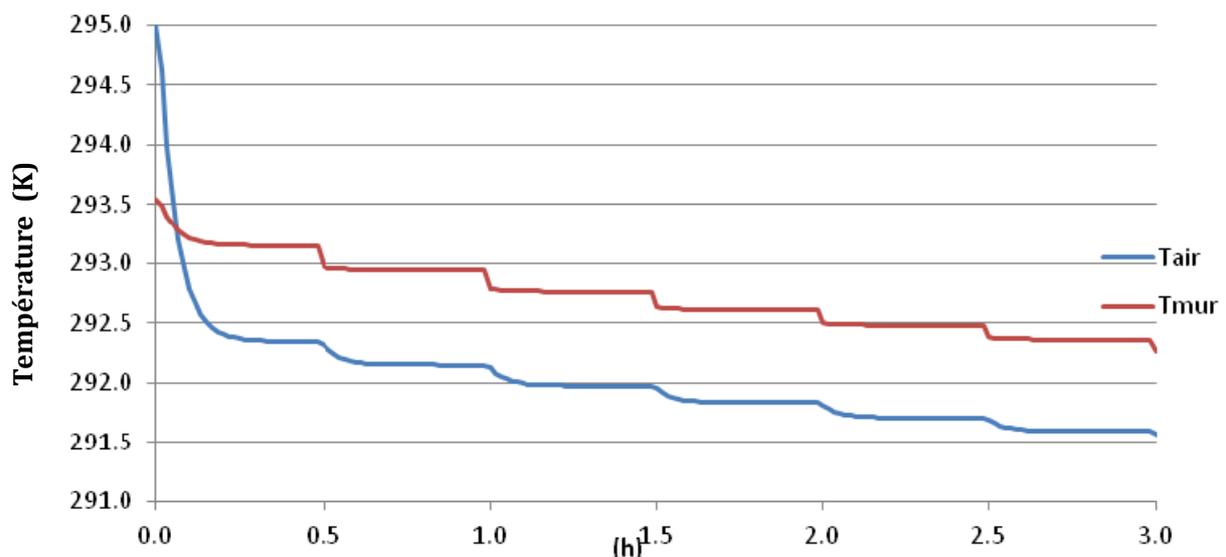


Figure 1 – Evolution de la température de l'air et des murs lors de la coupure du chauffage.

D'après la Figure 1, on peut diviser l'évolution en deux parties :

1^{er} - Chute brutale de la température à cause de la ventilation et parois plus froids que l'air. Cette chute de température rapide est du au fait que les températures des parois sont plus faibles que l'air et donc lors de la coupure l'air va perdre de la chaleur par la ventilation ou infiltration et par les effets de convection avec les parois. Cette chute de température est moins visible quand la capacité du nœud d'air prend en compte la capacité du aux meubles.

2^{ème} – Dans un deuxième temps la température des parois devient plus grande que la température de l'air et le transfert de chaleur entre l'air et les murs s'inverse. A partir de ce moment la chaleur perdu par l'air est principalement du à la ventilation.

Une fois qu'on a enlevé tous les éléments de la pièce qui jouent statiquement (air, vitrages...), il reste des matériaux ayant une capacité calorifique. Si le temps reste limité la décharge ou recharge des murs peut être modélisée en massif semi-infini. Ensuite, on étudie des différentes méthodes pour calculer les évolutions d'air dans la pièce et le flux d'énergie perdu par l'air. Ces méthodes permettront ainsi calculer les températures pour des pas infra-horaires et d'évaluer le confort thermique d'une forme simple pour des coupures du chauffage.

1^{er} Modèle thermique

Pour simuler la première partie de la chute de température on suppose que la température des parois est toujours constante et que la température d'air peut changer.

A partir de l'équation suivante de premier ordre, on calcule l'évolution d'air:

$$M_{air} C_{air} \frac{dT_{air}}{dt} = h S (T_{paroi*} - T_{air}) + \text{débit_d'air} C_{air} (T_{extérieure} - T_{air}) \quad (1)$$

Avec,

M_{air} – Masse de l'air [Kg]

C_{air} – Chaleur spécifique de l'air [J/KgK]

h – coefficient de convection intérieure [W/m².K]

débit_d'air – débit d'air de ventilation [Kg/s]

$T_{extérieure}$ – température extérieure [K]

T_{paroi*} – température de la paroi considéré comme constante [K]

Un exemple des résultats obtenus est montré dans la Figure 2.

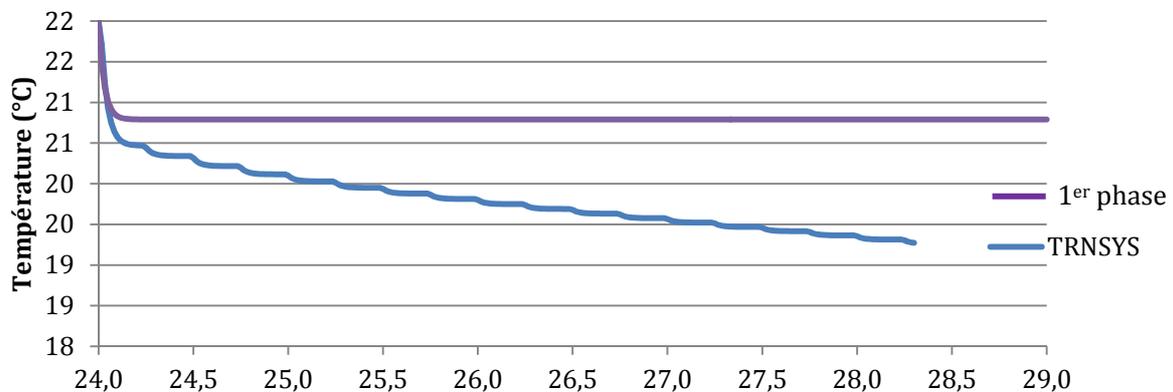


Figure 2 – comparaison de l'évolution de températures 1^{er} partie et simulation TRNSYS

On voit que la courbe violette (Equation 1) suit bien l'évolution des températures au début. Après les gains convectifs vont coïncider avec les pertes par ventilation, résultant dans une température d'air constante. Cependant cette chute de température n'est pas observable si la capacité de l'air devient plus importante, notamment quand la capacité des meubles est considéré dans le même nœud que l'air.

Pour évaluer la deuxième partie de l'évolution de température, on présente ensuite la méthode étudié, basé sur hypothèse d'un mur semi-infini.

Sachant que la pénétration moyenne est donnée par : $x = 1.83 \sqrt{a t}$ (2)

La décharge ou abortion d'énergie du mur est donné par :

$$\Phi dt = 1.83 (\sqrt{a(t+dt)} - \sqrt{at}) \rho C_{mur} S \Delta T \quad (3)$$

En faisant l'intégrale de l'équation précédente, on obtient :

$$\Phi = \frac{1.83}{2} \sqrt{\frac{a}{t}} \rho C_{mur} S \Delta T \quad (4)$$

On considérant que seulement la décharge ou absorption de l'énergie ira entrer dans le bilan énergétique de l'air, on a :

$$M_{air} C_{air} \frac{dT_{air}}{dt} = \Phi \quad (5)$$

Avec :

ΔT - Choque thermique : $T_{mur_initial} - T_{mur}$ [K]

a - diffusivité thermique = $\frac{\lambda}{\rho c}$ [m^2/s]

λ -conductibilité thermique [W/m.K]

ρ - masse volumique [kg/m^3]

c - chaleur spécifique [J/Kg.K]

S - Surface du mur [m^2]

Ainsi la température des murs dans la deuxième partie de l'évolution de température serai donné par :

$$T_{air}(t) = T_{air}(t-1) - \frac{\Phi}{M_{air} C_{air}} \quad (6)$$

La Figure 3 montre l'évolution de la température d'air en appliquant l'équation 6 à une paroi de béton avec 0.1 mètres d'épaisseur avec 0.1 mètres d'isolant par l'extérieur:

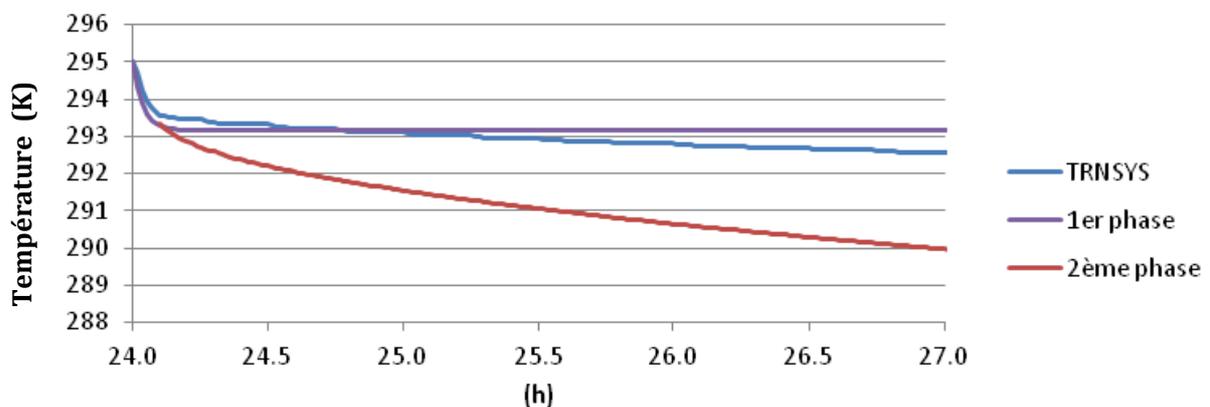


Figure 3 - Evolution de la température d'air en prenant les deux phases de calcul

D'abord le couplage entre la première partie et la deuxième est faite à partir du moment où l'évolution de la température de l'air de la première partie devient négligeable (<0.01 °K/min).

Comme on peut voir l'évolution de la température d'air reste très différente du cas de référence. De plus, cette équation reste très sensible au choc de température ΔT , ainsi des changements dans les différents variables de calcul du bâtiment (débits de ventilation coefficients de convection choisis, etc....) vont créer un ΔT différent et les résultats seront différents.

2ème Modèle thermique

Pour cette deuxième méthode on a considéré que les pertes par convection entre les parois et l'air ont été égales au flux d'énergie absorbé par les murs (Equation 7).

$$h_{int} S (T_{mur} - T_{air}) = \Phi \quad (7)$$

Avec,

h_{int} - coefficient d'échange par convection [$W/m^2.K$]

A partir de l'équation 7 on peut calculer la température des murs :

$$T_{mur} = h_{int} T_{air} \sqrt{t} + a T_{mur_initial} \quad (8)$$

On appliquant l'équation 8 dans l'équation 1, on obtient :

$$M_{air} C_{air} \frac{dT_{air}}{dt} = \text{débit}_a' \text{air} C_{air} (T_{ext} - T_{air}) + \frac{a h T_{mur_initiale} - a h T_{air}}{h\sqrt{t} + a} \quad (9)$$

Les figures suivantes montrent les résultats selon différents paramètres d'entrée :

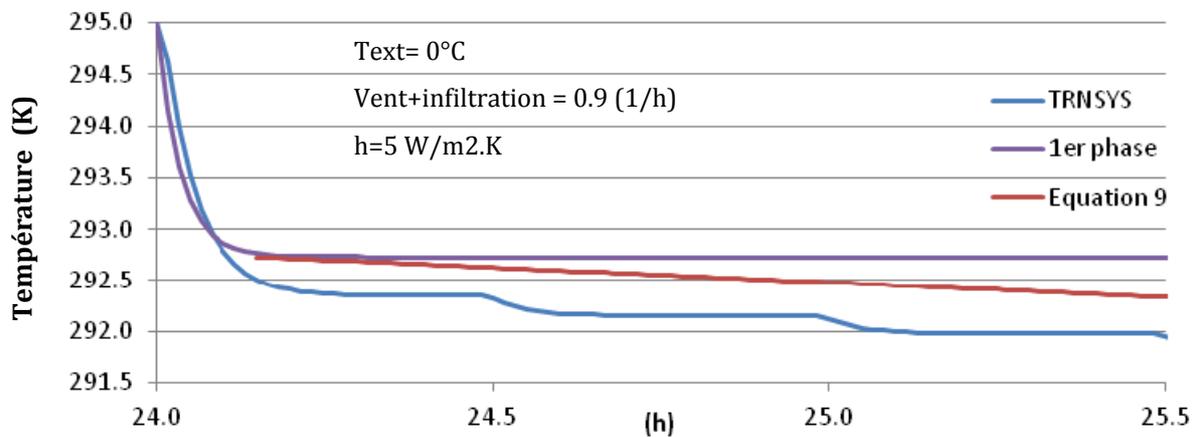


Figure 4 - Evolution de la température d'air selon l'équation 9

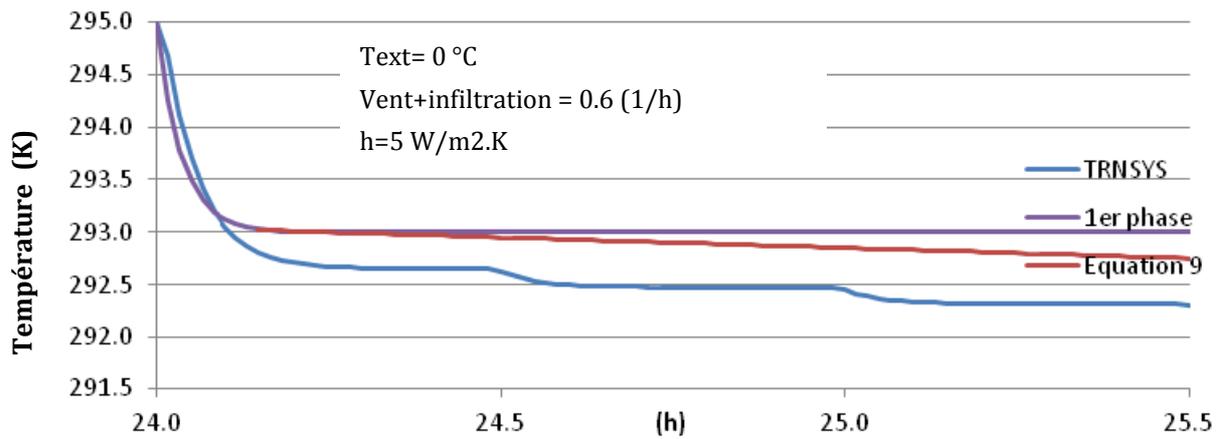


Figure 5 - Evolution de la température d'air selon l'équation 9 avec un débit de ventilation plus faible

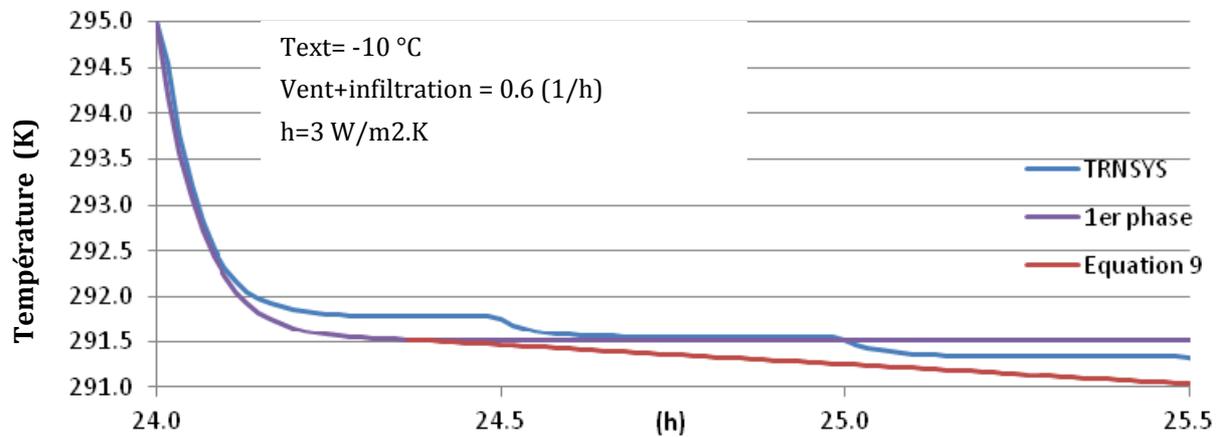


Figure 6 - Evolution de la température d'air selon l'équation 9 avec un h_{int} , une T_{ext} et un débit de ventilation plus petits

Avec cette méthode les résultats ont de 0.2 jusqu'à 0.5 K d'écart avec les courbes données par TRNSYS. On considère que la précision n'est pas suffisante pour nos calculs car à la fin de chaque 30 minutes (ou du pas de temps δ) il reste toujours un écart entre les températures données notre modèle et TRNSYS.

Dans un cas plus complexe avec apports internes et rayonnement solaire, il sera encore plus difficile de trouver la bonne température de l'air et cet écart peut devenir plus important.

De plus, comme on applique la condition d'un mur semi-infini, il faut que les murs aient une inertie non négligeable. Ainsi pour les murs avec isolation par intérieure cette méthode ne peut pas être appliqué. La Figure montre les résultats pour une paroi avec isolation par intérieure.

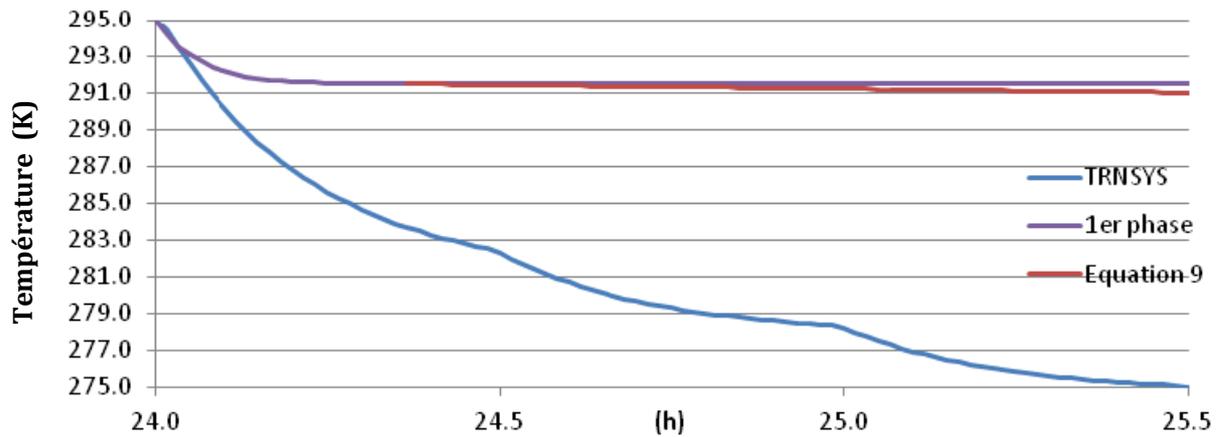


Figure 7 – Calcul de l'évolution de la température pour une paroi avec isolation par intérieure

La méthode proposée ne permet pas de calculer avec précision les évolutions de température pour des parois peu inertes.

Pour correctement évaluer le confort, il nous faut connaître la température des murs pour calculer la température opérative. Par conséquent, on a développé une troisième méthode pour avoir la température des murs.

3^{ème} Modèle thermique

Dans cette méthode, on a appliqué la méthode 1, mais cette fois on a découplé la température d'air et la température du mur. Ainsi l'équation de la température du mur devient :

$$T_{mur}(t) = T_{mur}(t-1) - \frac{\phi}{M_{mur}C_{mur}} \quad (10)$$

Une fois calculé la T_{mur} , on applique cette température à l'équation que représente le bilan énergétique sur le nœud d'air :

$$T_{air} = T_{air}(t-1) + \text{hint } S (T_{mur} - T_{air}) + \text{débit_d'air } C_{air} (T_{ext} - T_{air}) \quad (11)$$

Pour tester la précision et sensibilité des équations 10 et 11 on a appliqué cette méthode avec des différents paramètres d'entrée.

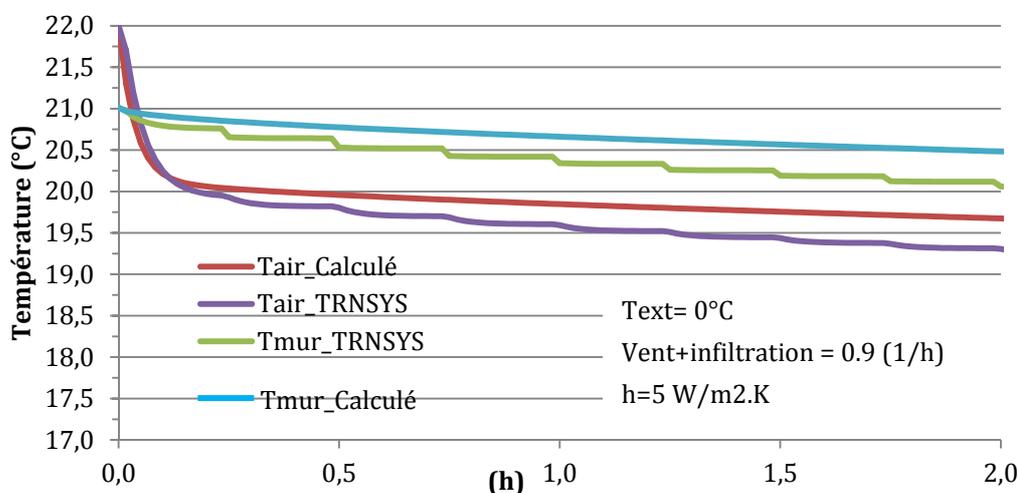


Figure 8– Evolution des températures de l'air et parois calculés et simulés

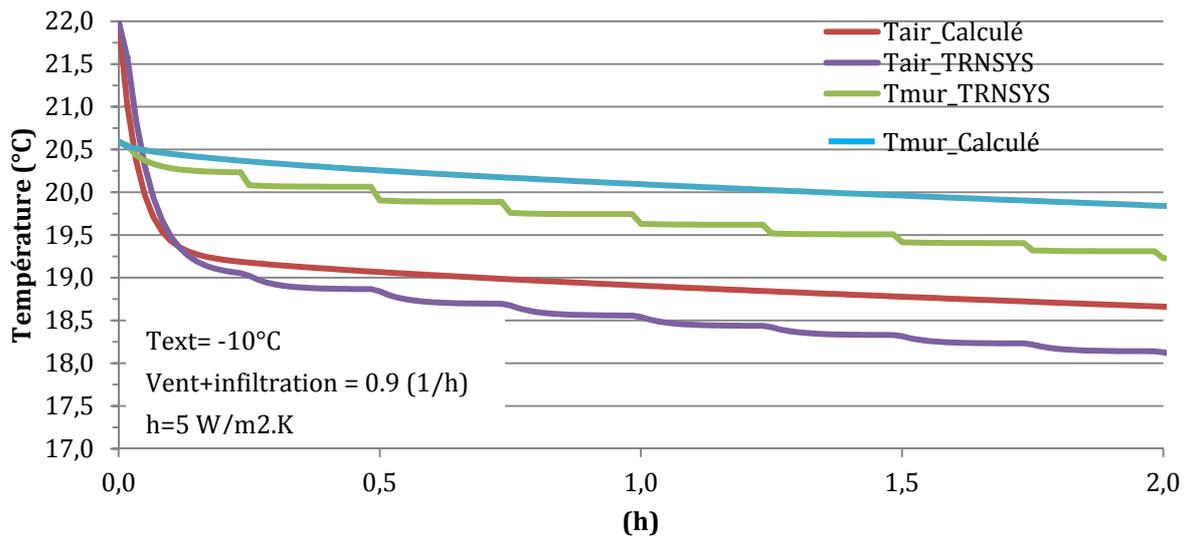


Figure 9 - Evolution des températures de l'air et parois calculées et simulées avec le 3^{ème} modèle pour des différents valeurs d'entrée

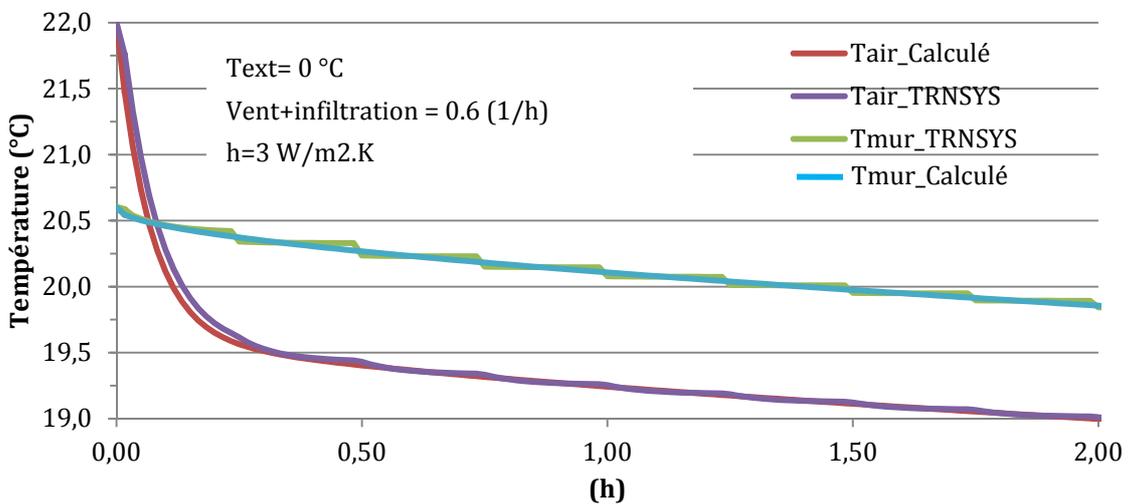


Figure 10 - Evolution des températures de l'air et parois calculées et simulées avec le 3^{ème} modèle pour des différents valeurs d'entrée

On peut voir que les courbes de températures calculées avec cette méthode suivent plus ou moins bien l'évolution de température de TRNSYS, spécialement dans la figure 10. Cependant pour les deux premiers cas, on a, à la fin de 1 heure, une différence de 0.5 °C. Comme il était dit précédemment, dans un cas réel avec des gains internes et des flux solaires sera plus difficile de trouver la bonne température des parois et de l'air avec précision.

Comme la précision de ces modèles ne permet pas le couplage avec TRNSYS et que leur précision reste variable en fonction des valeurs d'entrée, on a écarté l'application de ces modèles.

Annexe II – Room air conditioner load control under summer comfort constraint

Room air conditioner load control under summer comfort constraint

David Da Silva, Massimo Brancaccio, Bruno Duplessis and Jérôme Adnot

Center for Energy and Processes – MinesParistech

ABSTRACT

Load control options interest is growing because it can represent a response to future network investments and to congestion problems. In this frame, the present paper gives a methodology to quantify the value of load control for heat pumps (room air conditioners), in small tertiary and residential buildings, considering the occupant's comfort and the electrical grid needs for load shift.

This methodology was applied to a small office building where simulations were made using TRNSYS software.

It was found that a significant demand relief can be achieved by load control. However each control is followed by a recovery effect, which causes high peak consumption. In terms of comfort, this study shows that during the summer season some control strategies can be applied without affecting the occupant's comfort. Nevertheless during a heat wave comfort conditions are not achieved.

1. INTRODUCTION

Increasing interest in demand side management strategies appear more and more as a solution to electrical network problems. These problems include the need for future network investments, an increasing peak power consumption, transmission and distribution congestion problems which can be solved or reduced with the implementation of DSM strategies and smartgrid equipments.

Strategies such as load control can have a large impact in the resolution of these problems, especially in system stress situations. However there is a lack of methodologies to quantify the benefits and costs of DSM (Strbac, 2008).

DSM strategies can be applied to several electrical appliances, like HVAC systems, hot water heaters, washing machines and others.

In France, there is an important summer electrical gradient of 500 MW/°C (RTE, 2009). Regarding the load shift potential, and due to its coincidence with the summer electrical peak (Figure 1), around 13h (1p.m), heat pumps control load can have big impact in stressed electric networks.

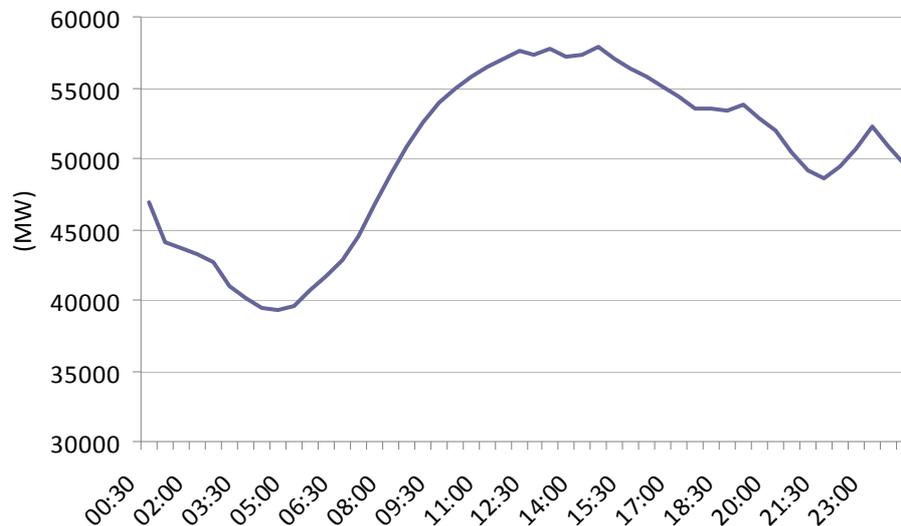


Figure 0-1 – French typical summer load curve (Réseau de transport d’électricité)

Regarding flexibility, systems that can store electric energy in another type of energy (for example thermal energy) are among the most interesting for DSM (Stadler, 2008) because they allow longer curtailment times and can be combined with heat pumps. In this article we focused on heat pumps (“reversible split systems”), without any type of heat pump storage component (like cold water tanks), considering only the building thermal inertia as a flexibility component.

Reddy (Reddy, T.A et al., 1991) developed a methodology to evaluate load curtailment potential of an air conditioner as a function of building thermal inertia. Nevertheless his analysis was based in a simple equivalent thermal parameter (ETP) model (one resistance and one capacity) that does not reflect the real temperature fluctuation in a building (ORPHELIN, 1999)

Srinivas (Srinivas & Ning, 2006) evaluated different control strategies applied to HVAC systems. However the impact of different external conditions, during a control, regarding peak power and the subsequent comfort impact are not quantified.

Advanced control strategies were studied by Kyoung-ho (Kyoung-ho & Braun, 2008), where the heat pump control takes into account the building thermal mass and occupants to create an optimized pre-cooling. Although this strategy seems to be very attractive, advanced control is needed to correctly apply this strategy. Since this article is focused on small tertiary and residential buildings this kind of strategies will not be evaluated.

In this paper a methodology is developed to quantify the value of different load control strategies for room air conditioners (RAC), in small tertiary and residential buildings, taking into account

occupant’s comfort, defined in EN 15251 (EN 15251, 2007), and the electrical grid needs for load shift.

2. SIMULATION METHODS AND EQUIPMENT SPECIFICATION

2.1 Simulation characteristics

To be able to couple Multizone building thermal evolutions with the RAC operation, a set of simulations was done with TRNSYS software (TRNSYS, 2000), where the energy effects (positives and negative) and comfort impacts of heat pump control load shift could be determined. These simulations make possible a random characterization of the control impacts due to weather evolutions. A small office building with two floors and a total surface area of 1000 m², representing 25% of the French stock, was chosen (Andre, P. et Al., 2009). The building plan is the same for the two floors and it is shown hereafter.

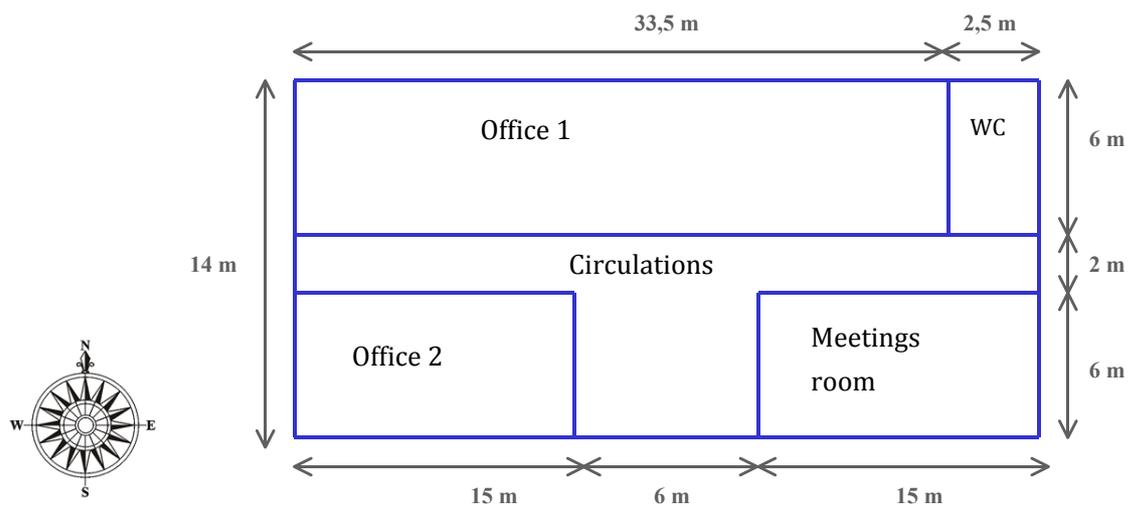


Figure 0-2 – Building plan

The building is simulated for the “Nice - France” climate using *Meteonorm data*, since this region suffers congestion and peak consumption problems during summer.

In order to simulate the heat pump (room air conditioner) operation, full-load and part-load, a model created by Marchio and Filfil (Marchio & Filfil, 2004) was implemented in *TRNSYS* and coupled to the building. Standard manufacturer parameters were used in this study.

For each building room the heat pump power was dimensioned for the maximum sensible and latent needs. Since almost all split heat pumps available in the market do not control humidity in the room, we considered a surplus of 20% of capacity to take into account the latent loads.

Simulations were made with a 1 minute time step to be able to correctly evaluate the comfort impact of each load control strategy.

2.2 Heat pump control and comfort criterion

To correctly consider the occupants comfort, the recommended interior operative temperatures for energy calculation, category II, from the EN 15251 were considered (EN 15251, 2007).

Table 25 – EN 15251 - Temperature ranges for energy calculations

Type of building / space Category	Acceptable T_{op} (°C) range	
	Heating season ~ 1,0 clo**	Cooling season ~0,5 clo**
Offices and spaces with similar activity Sedentary activity ~1,2met*	I 21,0 – 23,0	I 23,5 – 25,5
	II 20,0 – 24,0	II 23,0 – 26,0
	III 19,0 – 25,0	III 22,0 – 27,0

*met – metabolism rate

**clo - unit that defines the equivalent insulation provided by clothes

There is a difference between the heat pump control temperature (air temperature) and the operative temperature, which is used to define comfort conditions within EN 15251 (EN 15251, 2007). Caillet (Caillet, J. et Al., 2009) has shown that a constant air temperature set point is not able to guaranty comfortable operative temperatures, taking into consideration the EN 15251 temperature ranges.

To simulate occupants' behavior, it was supposed that the occupants can interact with each RAC air set point at the end of each hour to achieve an operative temperature of 24.5 °C, during occupation hours, achieving this way a comfortable operative temperature. As it can be seen in Figure 0-3, to achieve an operative temperature around 24.5 °C, at 1 p.m, the heat pump set point needs to be set to 22.3 °C, e.g. to maintain a constant operative temperature the set point must vary with the building cooling loads.

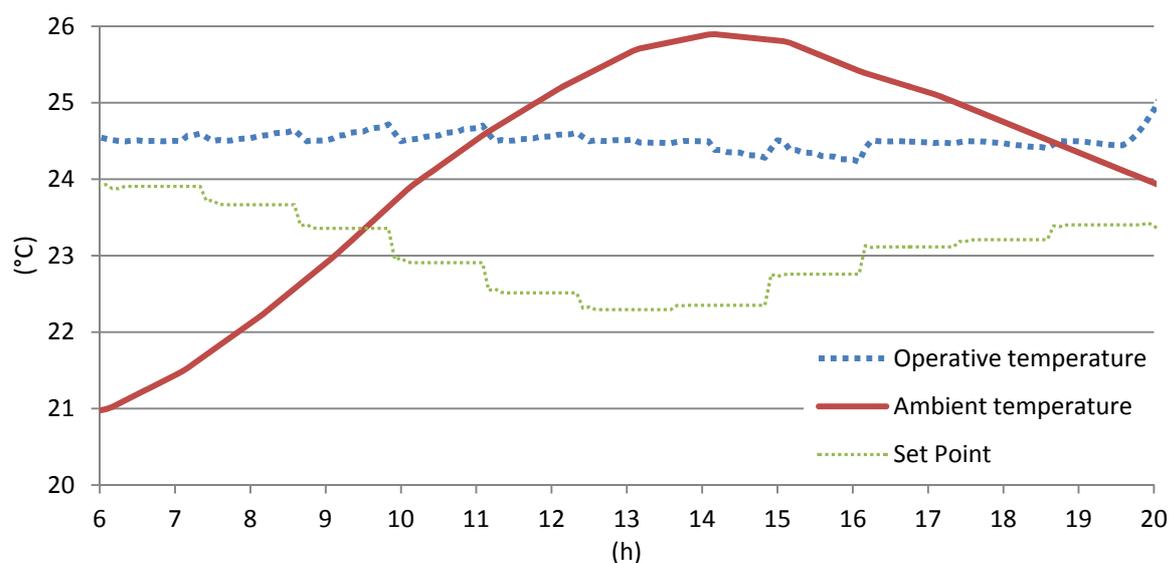


Figure 0-3 – Effect of occupant's comfort over the set point temperature

However during a control strategy, it is assumed that the occupants can stand an operative temperature of 27°C, passing from the equivalent 10 % PPD to 15 % PPD¹⁹, or assuming that a ventilator is available in the room, increasing the temperature tolerance at the maximum of one degree (according to EN 15251).

The thermal comfort is evaluated in the room with the larger cooling needs (“Office 2” south orientation – Figure 2). This way the maximum discomfort is quantified and it is ensured that other rooms will have a lower comfort impact.

2.3 Control strategies for load curtailment

For each strategy applied there can be more or fewer gains in terms of power consumption reduction, however their comfort impacts can be very different. To evaluate the potential of load shift and load reduction strategies during the French summer electrical network peak, three load control strategies were selected:

- i. Total Load curtailment (TLC) – one hour operation suspension
- ii. Multiple load curtailments (MLC) – two times 30 minutes operation interdiction with a time interval of 30 minutes between them (combined interdiction: 30 + 30 = 1 hour)
- iii. Capacity reduction (CR) – Reduction of the heat pump capacity by 50 % for two hours

Each one of the selected strategies is evaluated, in terms of energy impacts, for the entire building.

Our study is focused in the French electric network, where the electrical network peak occurs normally around 1 p.m every summer day working. So the described strategies were applied each day of the cooling season at 1 p.m and compared with the reference case (normal operation without control strategy). This way the energy and comfort value of each strategy can be evaluated for the entire cooling season.

During heat waves the electric network becomes less reliable due to congestion problems and peak consumption (electric thermal gradient). Therefore emergency load controls can play an important role, avoiding severe problems like black-outs. To evaluate the role of the selected strategies during a heat wave, simulations were made for during ten consecutive days, where the daily average temperature was 24°C.

2.4 Analysis indicators definition

The heat pump operation is a function of the building thermal state. It is expected that, if a load curtailment control is applied to a heat pump, the building thermal will change. Imagining load curtailment on a hot day, the building temperature will raise, meaning that when the heat pump is turned on again, it will have to compensate the energy that was absorbed by the building (Figure 4 - overconsumption).

¹⁹ - PPD – Percentage of Person Dissatisfied

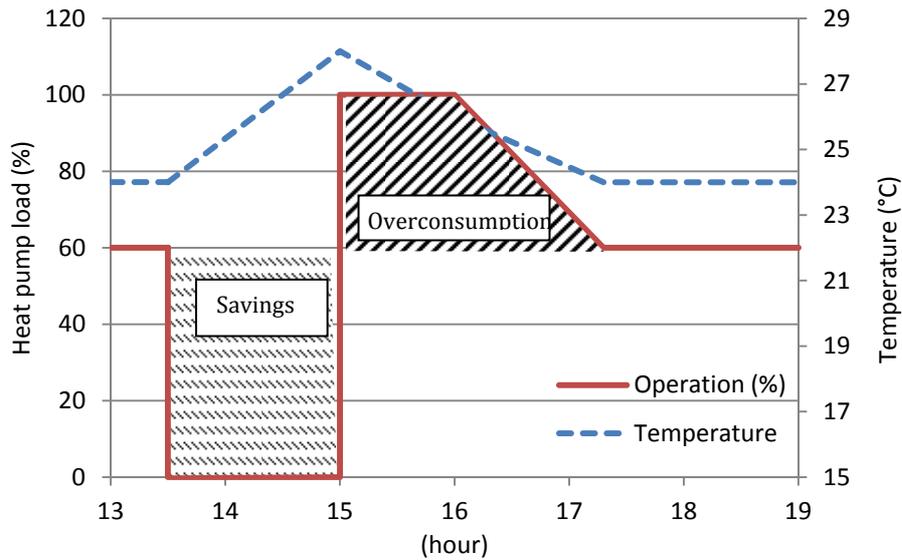


Figure 0-4 – Effects of heat pump load control

In order to analyze the energy effects and the discomfort caused by a heat pump load control, we define, hereafter, the following indicators:

- **Total consumption [Wh / m^2]:** Total heat pump consumption during the whole day per square meter (total building surface)
- **Energy savings during control [Wh / m^2]:** energy consumption per square meter (total building surface) difference between the reference case (normal operation) and the case with load control, for the period where the control is applied.
- **Overconsumption [Wh / m^2]:** energy consumption per square meter (total building surface) difference between the reference case (normal operation) and the case with load control, for the period after the control.
- **Recovery (%):** $\frac{Overconsumption}{Energy\ savings} \times 100$: indicates the quantity of energy that is consumed after the control compared to the energy saved during the control.
- **Degree-hours of discomfort:**

$$DH = \int \text{Max}[(T_{indoor} - 27^{\circ}C), 0]dt (1), \text{ where } T_{indoor} \text{ and } t \text{ is time}$$
- **Non comfortable days:** percentage of the days, during the whole cooling season where there room is considered as uncomfortable (when the operative temperature is higher than 27°C for more than 24 minutes)

3. RESULTS

Hereunder we present the average results for the whole cooling season.

3.1 Energy and power saved by load curtailment

In table 2 we present the average results for each control strategy regarding their energy effects.

Table 26 – Energy effects for the different control strategies

	Total consumption [Wh / m ²]	Energy savings during control [Wh / m ²]	Overconsumption after the control [Wh / m ²]	Recovery [%]
Total curtailment (TLC)	80.36 ± 24.26**	16.04 ± 5.58**	11.26 ± 3.10**	75 ± 17**
Multiple load curtailment (MLC)	80.36 ± 24.34**	15.67 ± 5.64**	10.89 ± 3.13**	75 ± 19**
Capacity reduction (CR)	81.50 ± 24.64**	9.30 ± 6.84**	5.66 ± 3.80**	71 ± 24**
Reference case	85.14	-	-	-

** - Standard deviation – The deviation is used to characterize the results distribution

The TLC strategy will generate the highest demand relief with an average of 16.04 Wh/m² saved. However this strategy has the largest overconsumption after the load control (11.25 Wh/m²). On the other hand the CR strategy will have a lower demand relief but it will have also a lower “payback effect”. Despite the differences between strategies the recovery phenomena seems to be almost the same for the three strategies with value around 75 %, meaning that 75 % of the saved energy during the control will be consumed once the RAC system comes on again.

Although energy effects give us an idea of the quantity of energy consumed, it does not give the load curve effects. Next, figure 5 shows the average consumption for each strategy.

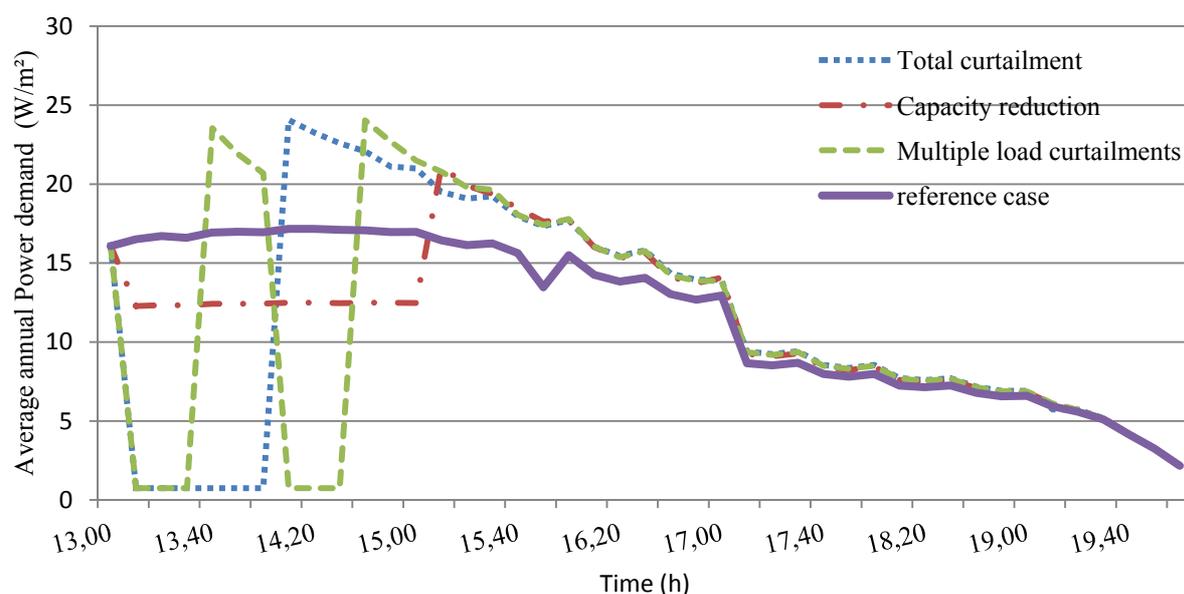


Figure 0-5 – Average annual consumption for different strategies

In figure 5 it can be seen that the MLC strategy creates two shorter and distinct demands reliefs that the TLC strategy. These peak consumptions are due to the fact that the building got warmer, making the RAC to operate at full load when it restarts. As we get further away from the restart time the over consumption will decrease gradually, so around 17-18h (5-6 p.m) (Figure 4) the consumption curves, for all strategies have almost the same value that for the reference case.

On the Figure 6, we show the avoided power (positive values), during a control, which reaches 16 W/m² for TLC and MLC. After the control period a surplus of power is needed (negative values), and a negative peak of 7 W/m² is created. Despite the CR strategy gives the lowest load reduction (4.5 W/m²), it has also the lowest impact after the control (4.5 W/m²).

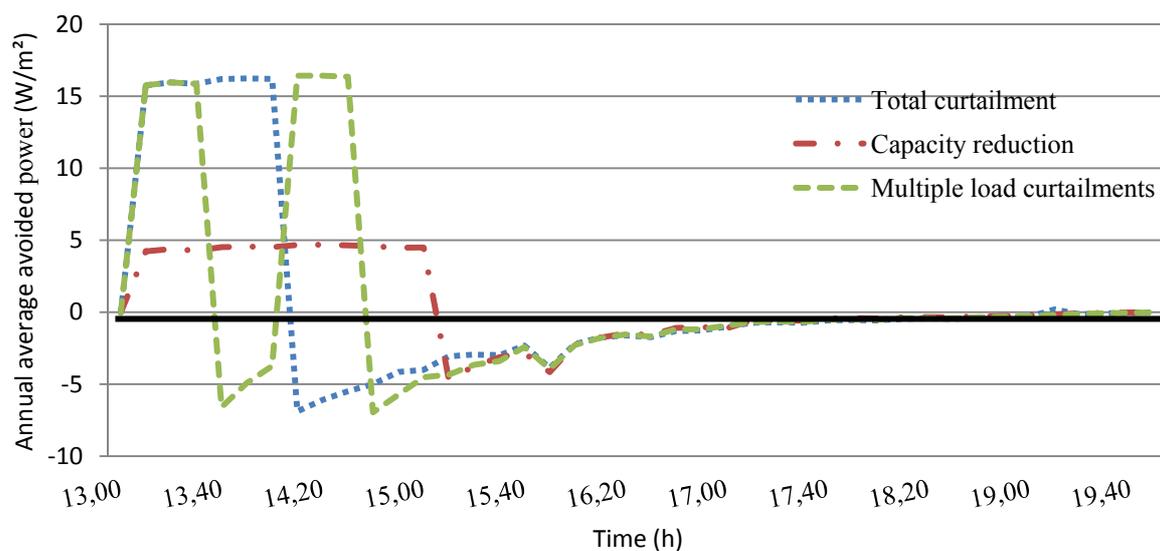


Figure 0-6 – Average avoided power (difference between strategies and the reference case)

3.2. Comfort in load curtailment condition

In this paper the occupants comfort is analyzed for the room with the highest cooling loads. The following figure gives an example of operative temperature evolution when each strategy is applied and for the reference case.

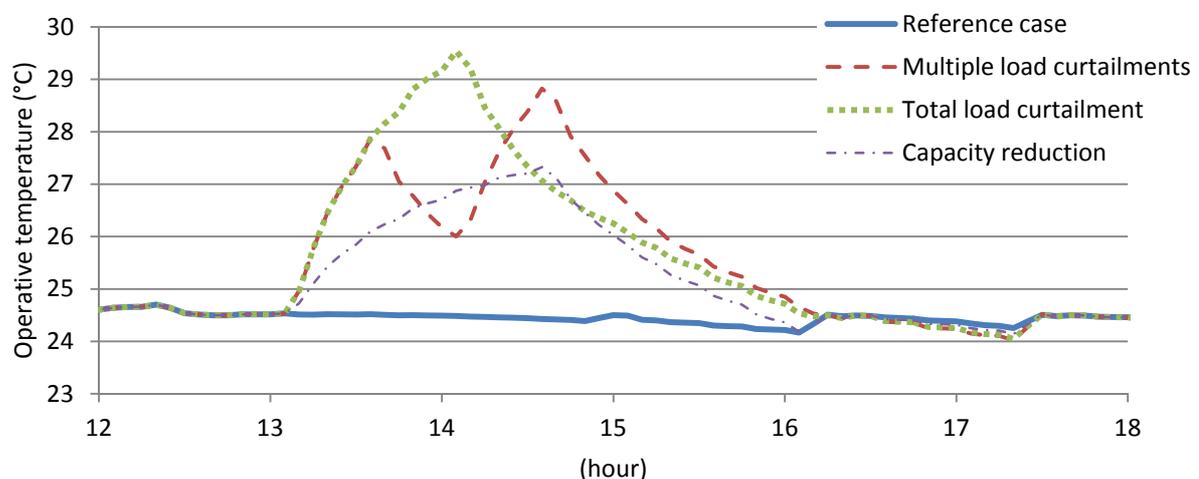


Figure 0-7 – Operative temperature evolutions for each strategy (example for one day)

It can be seen that with the TLC strategy the temperature reaches the higher temperature peak at almost 30 °C. On the other hand the CR strategy exceeds only by little 27°C, and its time over 27°C is short.

In table 3 we show the comfort impacts of each control strategy for the whole cooling season.

Table 3– Comfort impact for each strategy

	Total load curtailment (TLC)	Capacity reduction (CR)	Multiple load curtailments (MLC)
Non-comfortable days (Top>27°C for more than 24 minutes)	34.6 %	5.8 %	7.0 %
Number of minutes per day out of comfort range	19.65 ± 15.18**	12.09 ± 8.76**	6.90 ± 8.62**
Annual comfort impact	39.96 DH*	2.62 DH*	9.08 DH*

** - Standard deviation – The deviation is used to characterize the results distribution

As expected the CR strategy has the lowest impact on occupant’s thermal comfort with the lowest average non comfortable days and degree hours. Although the TLC and the MLC strategies seem to have the same energetic effects, in terms of comfort impact the MLC strategy has a smaller impact in occupants comfort. The minutes per day out of comfort range, for the MLC strategy, is 13 min/day less than for the TLC strategy.

The EN 15251 specifies that a building can be non-comfortable for 5% of its occupation hours per day. In our case the non-comfortable time-period represents 24 minutes, meaning that every strategy complies with the defined limit. The TLC strategy despite having an average number of minutes out of comfort range below the comfort criterion limit (24 minutes), it remains very close to the limit due to the MLC standard deviation (± 8.34 minutes), which shows that the comfort criterion will be exceeded very easily.

3.2 Heat Wave

Next we present the results for the energy impacts when load controls are applied during a heat wave, which represent the ten consecutive hottest days for the “Nice- France” climate.

Table 4 - Energy effects for the different control strategies during Heat wave

	Energy savings [Wh / m ²]	Overconsumption after the control [Wh / m ²]	Recovery [%]
Total curtailment (TLC)	22.94 ± 0.55**	12.65 ± 1.73**	55 ± 7**
Multiple load curtailment (MLC)	22.62 ± 0.56**	12.32 ± 1.70**	54 ± 7**
Capacity reduction (CR)	19.34 ± 1.73**	10.34 ± 1.52**	53 ± 4**

** - Standard deviation – The deviation is used to characterize the results distribution

The results in table 4 show that due to higher consumption of the RAC in the reference case (no control), we can achieve larger savings during a control. For TLC and MLC savings around 22.6 Wh/m² can be achieved for this building type. The CR strategy has a similar energy saving when compared with the TLC and the MLC strategies during a heat wave.

The recovery effect has an average value of 55 % for all strategies in a heat wave condition, which is lower than the annual average. The reduction of the recovery effect is explained by the fact that the RAC is almost operating at full-load for the reference case (*Saturated*). When the RAC is restarted only a little surplus of power can be consumed. This feature will harm even more the comfort since the room temperature will decrease slowly, resting this way more time outside of the comfort range (Table 5).

Table 5 - Comfort impact for each strategy during a heat wave

	<i>Total load curtailment (TLC)</i>	<i>Capacity reduction (CR)</i>	<i>Multiple load curtailments (MLC)</i>
<i>Non-comfortable days</i>	10/10	9/10	10/10
<i>Time out-of-comfort zone per day (min)</i>	35.23 ± 4.31**	26.57 ± 13.45**	30.42 ± 7.38**

** - Standard deviation – The deviation is used to characterize the results distribution

The comfort impacts increases significantly when compared with the averages for the all cooling season. In the event of a heat wave no strategy can be considered as comfortable in agreement with EN 15 251.

4. DISCUSSION

The results give a value for the flexibility that can be provided by RAC systems in small French office buildings. Nevertheless this methodology can also be applied to residential buildings, by modifying building characteristics. We consider that the ongoing study will not change strongly the conclusions since the phenomena of air change and conduction through building shell will not be very different according to building types. However special attention should be taken, regarding special building types because they can have different internal gains.

Total load curtailment (TLC) strategy provides the largest demand relief. However large peak consumption is created immediately after the load control. The Multiple Load Curtailments (MLC) strategy presents the same problem, though instead of one single peak consumption, two peaks are created with the same magnitude. For the electric network this feature can create a problem because the peak consumption is only avoided during a limited time period and when the RAC restarts another peak consumption is created.

On the other hand the CR strategy has a lower peak consumption reduction and a lower peak consumption problem after the load control. With this strategy high current problems caused by the start of the electric motor can be avoided.

The comfort results raise the problem of acceptance by occupants of a load control, which can be a barrier to the deployment of air conditioners load controls. It was seen that only for TLC strategy the time out of comfort range was exceeded, considering our comfort range hypotheses, for the whole cooling season. However MLC strategy has an average time out of comfort very close to the defined comfort limits, its standard deviation shows that the comfort limits can be exceeded very easily.

For load control during a heat wave, it was seen that none of the studied control strategies complies with the comfort ranges. Since the DSM strategies applied during a heat wave are normally emergency strategies, some kind of monetary reward could be suitable. Grignon-Massé (Grignon-Masse, 2010) has developed a methodology to evaluate costs of the discomfort in ambience for office buildings. In his study, he analyzed the working performance decrease as a function of the interior temperature, providing this way a cost to the discomfort. However sociological studies are necessary to define the value of this reward in the residential sector.

Regarding the energy effects during a heat wave, the demand relief will be higher since the RAC systems will operate near the full-load. The energy savings will be more or less identical, around 20 Wh/m², for the three strategies. However the reconstitution is lower than for the average cooling season due to the RAC systems saturation, i.e. during the heat wave the RAC will operate at full-load for the reference case, so when the RAC is restarted only a little surplus of power can be consumed. Because of this feature, over dimensioned systems can increase the recovery problem but decrease also the comfort impact during a control.

5. CONCLUSIONS

In this article a methodology was developed to analyze the energy potential of RAC systems taking into account occupant's comfort. This methodology was applied to a small office buildings representative of the French stock during the whole cooling season.

The results show that a large demand relief can be achieved as high as 16 W/m², during one hour, for TLC and MLC strategies. However important peak consumption and recovery effect will appear after the load control period. This can create a network problem, when several buildings are controlled at the same time, where strategies to avoid cold load pick up²⁰ should be taken into account.

CR strategy will have a lower demand relief and less peak consumption, however the reconstitution effect will be almost the same as for the other strategies, remaining around 70 %.

The comfort impacts have shown that in general during the cooling season only the TLC strategy does not comply with the defined comfort limits. This means that a potential load control can be made without interfering with the occupants comfort.

The analysis during a heat wave has shown that none of the simulated strategies complies with the comfort limits, at that time monetary rewards could be needed to convince the occupants to allow any load control.

²⁰ - Cold load pick-up: After a load disturbance on the electric network, the reconnected load will be, in general, higher in size and will have a different behavior than the electric network before the disturbance.

6. PERSPECTIVES

Future works will be made to evaluate other control strategies, and other air conditioner equipments (Chillers, Variable Refrigerant Volume air conditioning units...) which could allow different control strategies. A study about the control limits should also be made, i.e. which is allowed control time without affecting the thermal comfort?

An analysis of a load aggregation for a large number of buildings should be made in order to estimate the impact of each strategy in the electrical network.

These studies could be preceded by a more detailed analysis of the thermal comfort in a room, not analyzing only the average temperature in a room, but taking into account the different local discomfort and other variables like humidity.

REFERENCES

Caillet, J., Riviere, P., & Adnot, J. (2009). Simulation of control options for HVAC managements of typical office building. Climamed 2009 Proceedings .

EN 15251. (2007). Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité d'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique.

Grignon-Masse, L. (2010). Développement d'une méthodologie d'Analyse Coût-Bénéfice en vue d'évaluer le potentiel de réduction des impacts environnementaux liés au confort d'été. Mines-paristech.

Kyoung-ho, L., & Braun, J. (2008). Model-based demand-limiting control of building thermal mass. *Building and Environment* , 43, 1633–1646.

Marchio, D., & Filfi, S. (2004). Modèle simplifié d'un système Split. Ecole des Mines de Paris, Centre Energétique et procédés.

ORPHELIN, M. (1999). Méthodes pour la reconstitution de courbes de charge agrégées des usages thermiques de l'électricité.

Andre, Philippe., Bertagnolio, S., Caciolo, M., Franck, P.Y., Rogiest, C., Sarrade, L., Stabat, P.. (2009). Analysis of building heating and cooling demands in the purpose of assesing the reversibility and heat recovery potentials. IEA - ECBCS Annex 48.

Reddy, T., Norford, L., & Kempton, W. (1991). Shaving residential air-conditioner electricity peaks by intelligent use of the building thermal mass. *Energy* , 16, 1001-1010.

Réseau de Transport d'électricité (n.d), retrieved June 2010, from www.rte-france.com

RTE. (2009). Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France. Réseau de transport d'électricité.

Srinivas, K., & Ning, L. (2006). Evaluation of Residential HVAC Control Strategies for Demand Response programs. *ASHRAE Transactions* .

Stadler, I. (2008). Power grid balancing of energy systems with high renewable energy penetration by demand response.pdf. *Utilities Policy* , 16, 90-98.

Strbac, G. (2008). Demand side management: Benefits and challenges. *Energy policy*, 36, 4419-4426.

TRNSYS. (2000). TRNSYS 16 with Isibat . University of Wisconsin.

Annexe III - Evaluation of thermal appliances demand response actions in the electrical market

6-518 + David DA SILVA

Evaluation of thermal appliances demand response actions in the electrical market

Author one – David DA SILVA
Center for Energy and Processes – MinesParistech

60, Blv Saint-Michel
75272 paris Cedex 06 - France
Email: david.da_silva@mines-paristech.fr

Author two – Bruno DUPLESSIS
Center for Energy and Processes – MinesParistech

60, Blv Saint-Michel
75272 paris Cedex 06 - France
Email: bruno.duplessis@mines-paristech.fr

Author three – Jerome ADNOT
Center for Energy and Processes – MinesParistech

60, Blv Saint-Michel
75272 paris Cedex 06 - France
Email: jerome.adnot@mines-paristech.fr

Abstract

Today due to new developments in the field of smart appliances and communications, new strategies in the residential sector can be employed to maintain the balance between electricity supply and demand. However the physical effects and the methods to evaluate the impact of these actions in the electric market system are not totally understood.

This article describes a methodology that makes possible the evaluation of Demand Response (DR) actions in thermal households' appliances, from which the possible benefits can be determined for the consumer and for the electric grid.

The demand response actions that serve as example are associated with electric home heating load shifting when responding to a day-ahead real-time-pricing.

A large number of electric heaters in operation are simulated through a simple building thermal model. From this model the available power shift can be derived, as well as the shifted energy. An important

feature is that due to the introduction of a thermal model in our analysis, the recovery effects (“pay-back” – overconsumption after the application of a load shift) can be also determined by comparison with a reference case where there is no load shift.

An additional aspect is related with power shift and power peaks created during and after the load shift. This aspect will provide important information on how much power can be reduced with the introduction of a DR action, but also to quantify the peak generation after the DR action.

The previously described simulations are then coupled with real-time-pricing tariffs which represent the actual electric power supply price. Subsequently economic benefits can be calculated at different times of the day and for different weather conditions, taking into account all the physical features described previously.

Introduction

During winter, the daily electrical peak reaches high values, normally at 19 hours in France, partly due to the large diffusion of electrical heating of buildings which presents a thermal gradient of 2100 MW/°C [RTE 2009].

In France 7 million buildings (Residential) are electrical heated and the most diffused types of electrical heaters are the electrical convector and the electrical radiator. These systems are widely spread because of their low initial investment, large renovation programs in the 80s and 90s and cheap electricity tariffs.

Taking into account this high value of thermal gradient, the large number of appliances, and the developments in communications, new control strategies can be suitable to apply in order to create a plainer load curve.

Together with these features the large smart meters installation all over Europe will allow the proposition of new tariff systems to consumers.

Several authors have studied the effects of control strategies in HVAC systems and their economic impacts. For example, Srinivas [Srinivas 2006] has studied the effects of different control strategies in air conditioners operation and the economic effects of these strategies for standard and advanced tariffs (Critical peak pricing). However it uses a very simple building model with two capacities and two resistances to simulate the building behavior, meaning that the temperature evolution is not accurately calculated [ORPHELIN 1999].

Da Silva [DA SILVA 2010] studied the effects of control strategies applied to air conditioners. However this analysis was based on a single building simulation, meaning that the effects of control strategies over a large number of users could not be quantified.

Reddy [Reddy 1991] developed a methodology to evaluate load curtailment potential of an air conditioner as a function of building thermal inertia. Nevertheless his analysis was based on a simple equivalent thermal parameter (ETP) model (one resistance and one capacity) that does not reflect the real temperature fluctuation in a building [ORPHELIN 1999].

In this paper, a methodology is developed to evaluate different Demand Response (DR) control strategies, for a large number of users, as a function of real time electricity production costs (Real time pricing – RTP).

Building thermal model

Because a large number of buildings have to be simulated, common building simulation software would require very long simulation times. In this frame, it was used a thermal model based in Nathan et al. and Wang et al. [Nathan 2001; Wang 2005] where an energy conservation equation is applied to each element through an electric analogy. Several other authors have used similar models to study the building thermal performance [HAZYUK 2010; Kyoung-ho 2004; Kyoung-ho 2008].

As a simplification only one zone is simulated for each building. This zone contains one exterior wall, with one window, and the interior walls are considered as adiabatic.

In order to do a dynamic simulation, an energy conservation equation is calculated at each time-step (1 minute) for each element by discrete time resolution.

For the outside layer of the external wall we obtain:

$$\rho_{we} c_{we} V_{we} \frac{dT_{we}(t)}{dt} = K_{i-e} S_e (T_{wi}(t) - T_{we}(t)) + K_{e-se} S_e (T_{se}(t) - T_{we}(t)) \quad (12)$$

where ρ_{we} , c_{we} , V_{we} , S_e , and $T_{we}(t)$ are respectively wall outside layer density, capacity, volume, surface and temperature. $T_{wi}(t)$ and $T_{se}(t)$ represent the wall interior layer temperature and exterior surface temperature.

K_{i-e} , K_{e-se} , K_{i-si} are respectively thermal conductance between the interior layer and the outside layer, the thermal conductance between the outside layer and the exterior surface and the thermal conductance between the interior layer and the interior surface.

The walls thermal conductance's are calculated as follows:

$$K_{i-e} = \frac{1}{R_{wi/2} + R_{we/2}} \quad (13) \quad K_{e-se} = \frac{1}{R_{we/2}} \quad (14) \quad K_{i-si} = \frac{1}{R_{wi/2}} \quad (15)$$

The generic resistance "R" is calculated by: $R=L/\lambda$ (16), L denotes the layer thickness and λ the conductivity.

The wall interior layer equation is written as follows:

$$\rho_{wi} c_{wi} V_{wi} \frac{dT_{wi}(t)}{dt} = K_{i-si} S_e (T_{si}(t) - T_{wi}(t)) + K_{i-e} S_e (T_{we}(t) - T_{wi}(t)) \quad (17)$$

where ρ_{wi} , c_{wi} , V_{wi} and $T_{wi}(t)$ are respectively wall interior layer density, capacity, volume and temperature; $T_{si}(t)$ represents the wall interior surface temperature.

The boundary conditions for the external (Equation 7) and internal surface (Equation 8) are written as follows:

$$K_{e-se} (T_{we}(t) - T_{se}(t)) = h_{ext} (T_{se}(t) - T_{ext}(t)) \quad (18)$$

$$K_{i-si} (T_{wi}(t) - T_{si}(t)) = h_{int} (T_{si}(t) - T_{air}(t)) \quad (19)$$

Where h_{ext} and h_{int} represent respectively the external and interior convection heat transfer coefficient.

The boundary condition of the internal surfaces of the room can be written as follows:

$$h_{int}(T_{sii}(t) - T_{air}(t)) + I_w = K_{ii-sii}(T_{wii}(t) - T_{sii}(t)) \quad (20), \text{ with } K_{ii-sii} = \frac{1}{R_{wii}/2} \quad (21)$$

where $T_{sii}(t)$, I_w , $T_{wii}(t)$ and K_{i-si} are respectively the internal walls surface temperature, solar radiation crossing the window, the internal wall layer temperature and the internal wall thermal conductance.

The equation of the internal wall temperature can be written as follows:

$$\rho_{wii} c_{wii} V_{wii} \frac{dT_{wii}(t)}{dt} = K_{ii-sii} S_i (T_{sii}(t) - T_{wii}(t)) + K_{ii-sa} S_i (T_{air}(t) - T_{wii}(t)) \quad (22), \text{ with } K_{ii-sa} = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + R_{wii}/2} \quad (23)$$

where ρ_{wii} , c_{wii} , V_{wii} , S_i , $T_{wii}(t)$ and $T_{sii}(t)$ are respectively the internal wall density, capacity, volume, surface and temperature and interior surface temperature.

The air equation is then written as follows:

$$\rho_{air} c_{air} V_{air} \frac{dT_{air}(t)}{dt} = h_{int} S_i (T_{sii}(t) - T_{air}(t)) + h_{int} S_e (T_{si}(t) - T_{air}(t)) - Q(t) + P_{heating}(t) \quad (24)$$

where ρ_{air} , c_{air} , V_{air} , $T_{air}(t)$ are respectively the internal air density, capacity, volume and temperature. $P_{heating}(t)$ represents the power delivered by the electric heater.

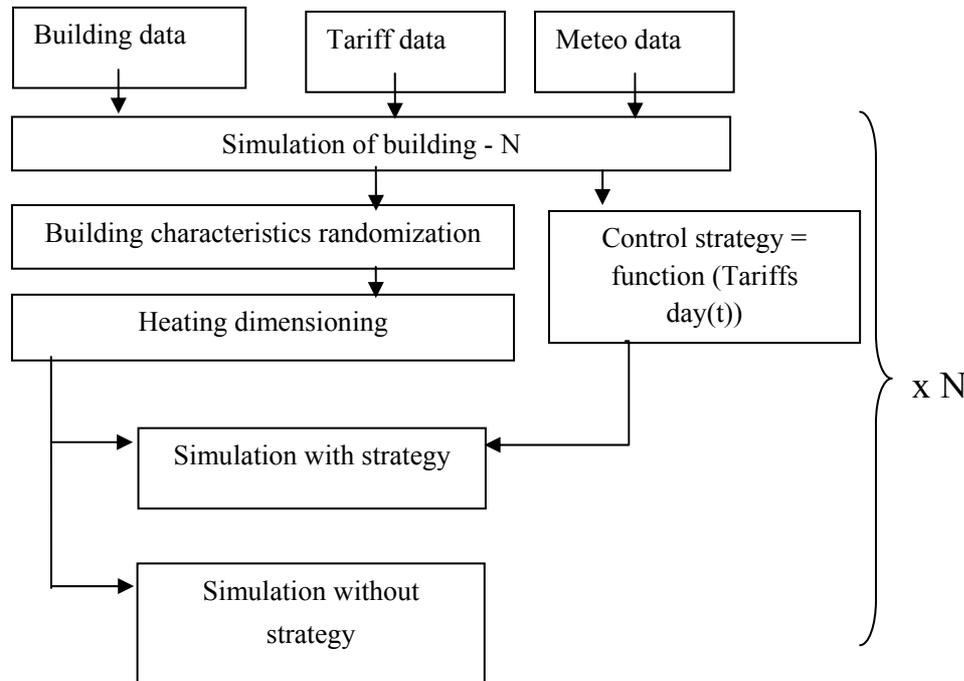
$Q(t)$ denote the losses by air change (infiltration and ventilation) and by the window (14).

$$Q(t) = U_{wind} S_{wind} (T_{air}(t) - T_{ext}(t)) + \dot{m}_{air} c_{air} (T_{air}(t) - T_{ext}(t)) \quad (25)$$

Where U_{wind} , S_{wind} and \dot{m}_{air} represent the window global heat transfer coefficient, window surface and the flow of air due to infiltration and ventilation.

Simulation procedure

The described mathematical model then was introduced into MATLAB environment. The simulation sequence is presented here after.



,where "N" denotes a specific building and "t" the simulation day.

Figure 0-1 – Simulation sequence scheme

In a first part, the building data is introduced together with the tariffs and the meteo data. Then for each building, from 1 to N, its characteristics are randomized, and the electric heating power is calculated according to a static building heat transfer for an external base temperature (equation 15).

(26)

An ON/OFF thermostat controls the electric heating with a deadband of 0.5°C.

In order to know when to apply a control strategy (see *control strategies section*) in day “t”, it is considered that the tariffs for the day t are known in advance. Afterwards, two simulations are made for the building with and without the application of the control strategy.

Finally the results from all buildings with and without the application of control strategy are analyzed.

Inputs information

To simulate accurately the French buildings stock, data from ADEME [ADEME 2006] and CLIP [CLIP 2001] was analyzed to determine the building age distribution (Figure 2).

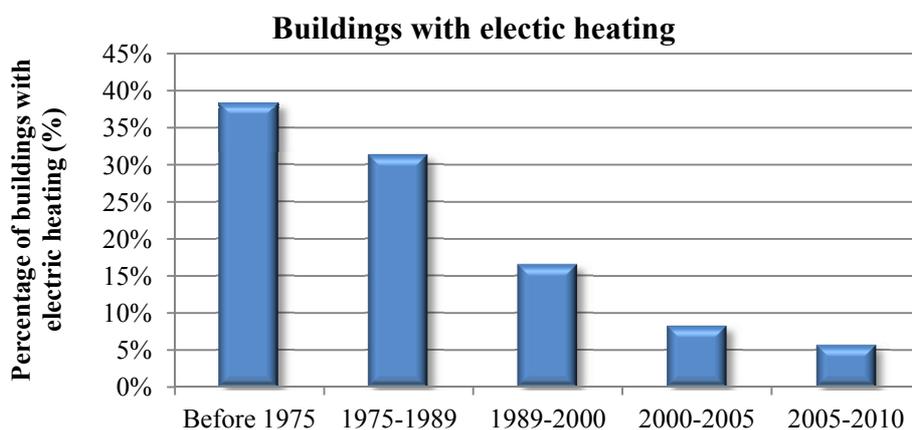


Figure 0-2 – Electric heated buildings French stock per building age

Building characteristics were analyzed for the French case. Since buildings from 2000 and forward are very well insulated, the electric power consumptions are quite low and the market share is also quite low, these buildings present a lower potential for load shifting. In this paper only buildings before 2000 are studied.

The data for each building is randomized around the value given by its equivalent French thermal regulation.

The randomized inputs included: walls conductivity, capacity and density; U-value of windows; external wall orientation; internal or external insulation layer; building initial state; electric heater set-point and ventilation rate. The next table shows the building variables range used in the simulations.

Table 27 – Building variables range

Variables		Range
Window U-value (W/m ² .K)		2.25 – 5.3
Wall U-value (W/m ² .K)		0.6 – 1.75
Heater Setpoint (°C)		20.9-21.1
Ventilation rate (ACH)		0.3-0.6
Insulation layer	Conductivity (kJ/h.m.K)	0.103-0.107
	Capacity (kJ/Kg.K)	980-1380
Structural layer	Conductivity (kJ/h.m.K)	2.04-2.08
	Capacity (kJ/Kg.K)	808-1208

To simulate a real time pricing tariff, data from the French Spot market (EEX-Spot) was chosen. As these prices reflects the power demand on the grid, the can give a good idea of a future electric market where the consumers have an active role.

The simulations are made with a one minute step, during an entire winter month for the “Trappes” region in France, close to Paris.

Control strategies

For all strategies presented hereafter, the load curtailment is only allowed when the air temperature (T_{air}) is equal or higher, than the setpoint temperature ($T_{setpoint}$) plus the deadband (Equation 16 and Figure 3).

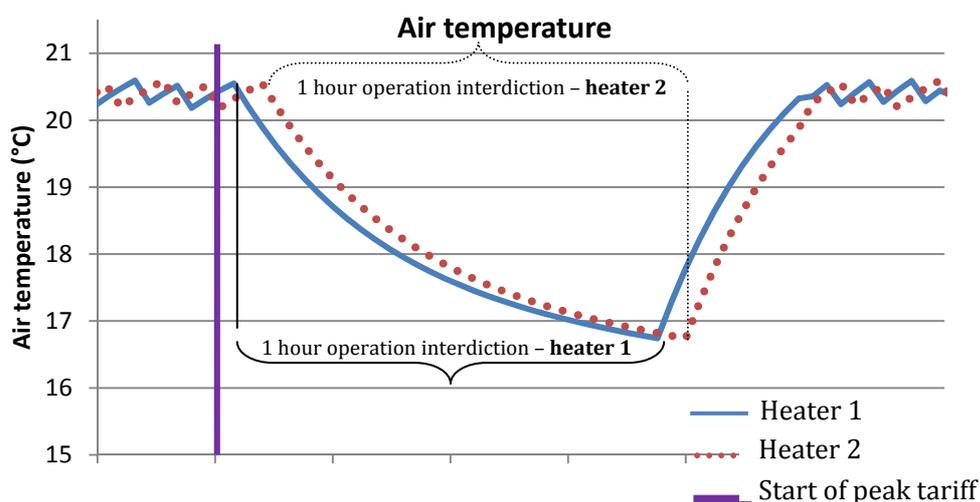


Figure 0-3 – Example of load curtailment allowance

$$\text{if } T_{air}(t) \geq (T_{setpoint} + \text{deadband}), \text{ Heater power}=0 \quad (27)$$

When the peak tariff starts, the heater will only be turned off when the air temperature reaches the high level of the dead band, as explained in Equation 16. Once the heater is turned off, it remains in this state for 60 minutes.

This condition will create a randomization of the curtailed load and the recovery phase start. This way the thermal comfort is insured for longer time since that at the curtailment moment the air temperature is always at its highest.

Two types of control strategies were studied:

- i. *Load curtailment during day peak price hour (LC)* – A load curtailment is made during each daily peak price hour.
- ii. *Load curtailment proceeded of one hour pre-heating (LCPH)* – Same as strategy i, but during the previous hour to day peak price hour, the setpoint temperature is increased by 2°C.

Definition of Indicators for Analysis

The electrical heating operation is a function of the building thermal state. It is expected that, if a load curtailment control is applied the building thermal will change.

Figure 4 gives an example of the predicted building-heater behavior due to load curtailment. The dotted line represents the indoor temperature and the solid line represents the electric heater operation percentage.

Imagining load curtailment (solid line decrease at 18:30) in a cold day, the building temperature will decrease (Dotted line), meaning that when the electric heating is turned on again (at 20:00 - solid line), it will have to compensate the energy that was lost by the building by operating at a higher level (in the example 100%) than before the load curtailment (60%).

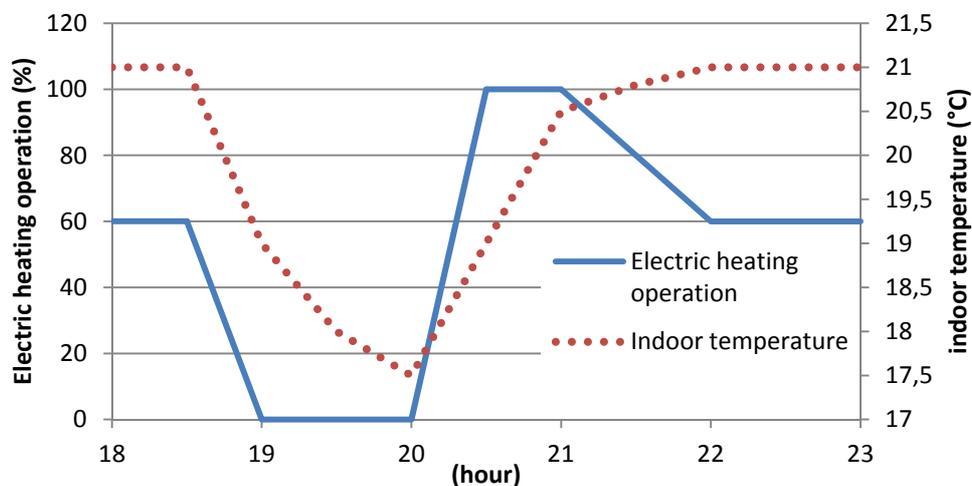


Figure 0-4 – Effects of electric heating load control

In order to analyze the energy effects and the discomfort caused by a control strategy, we define, hereafter, the following indicators:

Energy savings during control [kWh]: energy consumption per square meter difference between the reference case (normal operation) and the case with load control, for the period where the control is applied.

Overconsumption [kWh]: energy consumption per square meter (total building surface) difference between the reference case (normal operation) and the case with load control, for the period after the control or during the control (pre-heating situations).

Recovery (%): $\frac{\text{Overconsumption}}{\text{Energy savings}} \times 100$: indicates the quantity of energy that is consumed after the control compared to the energy saved during the control (in case of pre-heating strategies overconsumption is calculated by taking into account the overconsumption due to the preheating phase)

Degree-hours of discomfort:

$$DH = \int \text{Max}[(T_{op} - 20^{\circ}\text{C}), 0] dt \quad (28)$$

, where $T_{op} = (T_{air} + T_{walls})/2$ and t is time.

Time per day out of comfort zone (TOCZ): Indicate the time spend bellow 20°C ²¹ during each day.

Results and analysis

Analysis from grid viewpoint

The two simulated strategies have different impacts on the grid. In Figure 5 we show the average power, for 100 rooms, during an entire day for the two strategies.

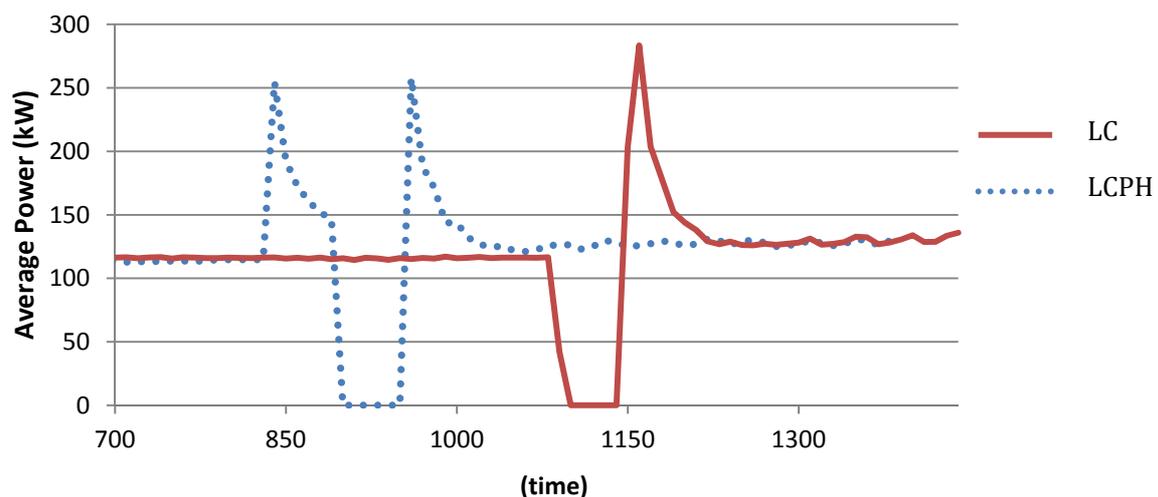


Figure 0-5 – Example of the grid impact for the LC and LCPH strategies

When the load curtailment is applied the power relief is total. However when the electric heaters are reactivated (even being randomized by some minutes) the consumed power will reach more than the double before the load curtailment. Then the power will slowly decrease as the electric heaters thermostats state will becoming more and more randomized. This phenomenon is commonly called cold-load-pickup [Agneholm 2000], as after an outage the diversity is lost.

Regarding the strategy with pre-heating of the building (LCPH), another peak appears this time before the outage. This peak is due to the increase of the thermostat setpoint. Next the results in terms of energy savings, the overconsumption and the recovery effect for the 100 simulated rooms are presented.

²¹ - 20°C (Operative temperature) denotes the lower limit of the confort zone according to EN 15251

The figure 6 shows the dependence of these variables over the external temperature for the all simulated rooms.

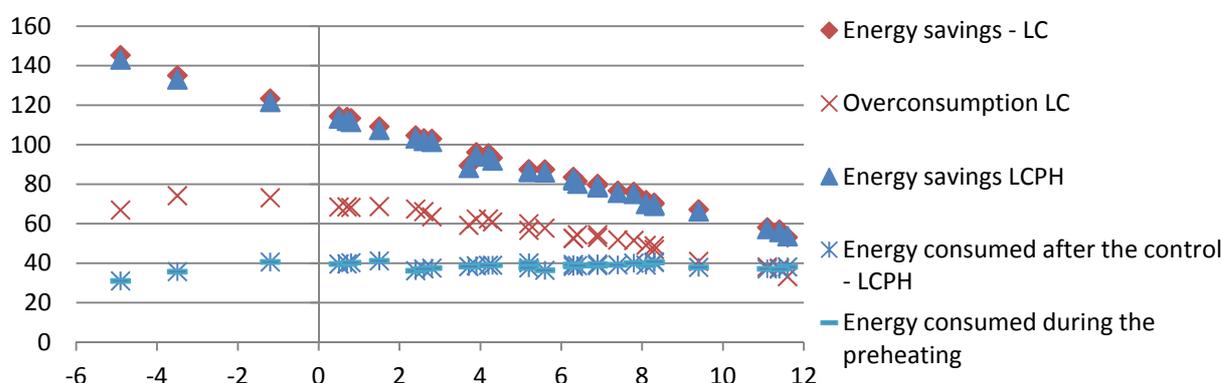


Figure 0-6 – 100 Rooms energy savings, overconsumption and preheating consumption as a function of external temperature for the two simulated strategies.

The overconsumption and preheating have almost the same value all through the range of external temperature. Energy savings have a proportional relation with the external temperature, as they increase for low external temperatures. This means that the recovery effect will be lower for low temperatures.

As expected the consumed energy after the control is lower for the LCPH strategy.

Table 28 – Recovery effect

Recovery (%)	Average $\pm 2\sigma$
LC	64,09 \pm 13,78
LCPH*	92,78 \pm 22,28

*-Recovery effect for LCPH takes into account the consumed energy during the pre-heating phase.

The Table 2 gives the values of the recovery effect for the two control strategies. For the LC strategy the recovery effect is on average 64 %. On the other hand for the LCPH strategy this effect can exceed 100 %, meaning that the energy consumed during the pre-heating phase plus the overconsumption phase will be higher than the energy savings dues to the load outage.

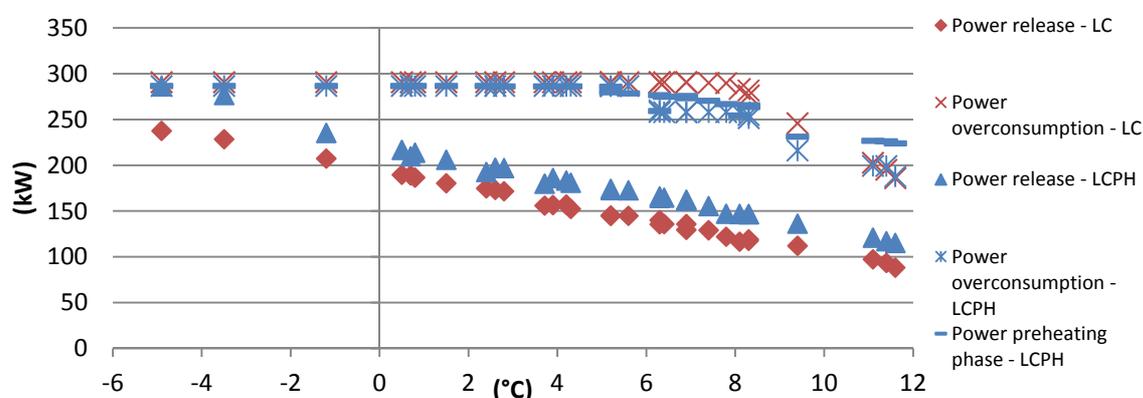


Figure 0-7 – Expected power relief, overconsumption and pre-heating phase as a function of the external temperature.

Figure 7 shows that as expected the power relief is higher for the strategy with pre-heating since the setpoint is set to a higher temperature before the outage. The over consumption power is slightly higher for the LC strategy as the building reaches a lower thermal state after the outage. The results also show that the pre-heating peak has the same magnitude as the overconsumption peak.

Another point that should be pointed out is that when the exterior temperature is lower than 6°C the over consumption peak power remains almost constant, meaning that full load is achieved.

Analysis from the consumer perspective

In this section it is presented the results in terms of comfort and economic impacts for the consumer.

The next table presents the statistics regarding the degree-hours of discomfort and the time out of the comfort zone for all individual rooms.

Table 3- Comfort analysis

	Strategy	Average +- 2σ*	Minimum	Maximum
Degree hours	LC	3,10 +- 3,78	0,128	12,70
	LCPH	1,68 +- 2,88	49,41	188,95
Time out of comfort zone (minutes)	LC	84,38 +- 50.20	0,014	203,00
	LCPH	59,42 +- 12.78	7,00	178,00

*σ- Standard deviation.

The time out of the comfort zone is reduced by 30 %, on average, when the strategy LCPH is used rather than LC. The degree hours of discomfort show the same tendency. Nonetheless if attention is paid to the maximum values of discomfort, the TOCZ, considered here, of the LCPH strategy presents a reduction of around 130 min when compared to the values of the LC strategy.

The EN15251 indicates that if a room is out of the comfort zone for more than 5% of the occupied hours a day (in our case 36 minutes), the room is considered as non comfortable. Taking this into account, it can be said that on average all DR actions exceed the time out of comfort zone per day.

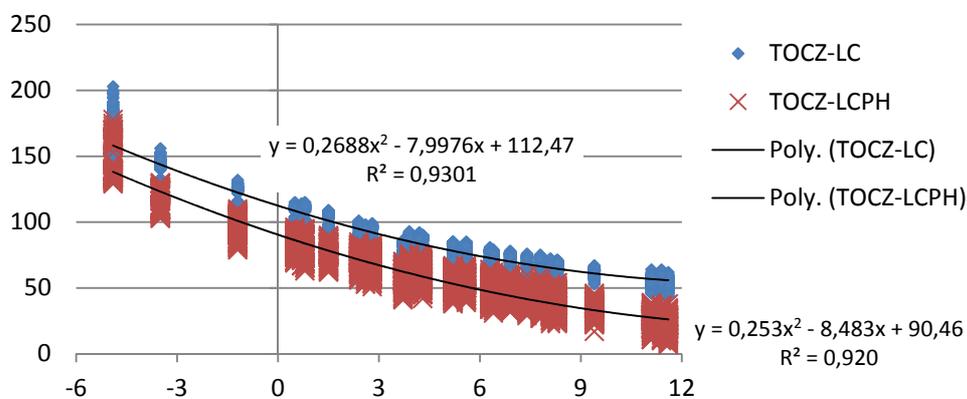


Figure 0-8 – Distribution of the TOCZ for the 100 simulated rooms as a function of the external temperature and strategy (LC and LCPH)

Figure 8 shows that the time out of comfort zone will deeply depend on the exterior temperature, rather than the building characteristics. The comfort difference can be seen for all the temperature range when compared the TOCZ for the LC strategy and the LCPH strategy.

The next table presents the results for the possible economical gains for the consumer when the load control strategies are applied with a real time pricing.

Table 4 – Consumer savings per day and month according to the load control strategy applied.

Strategy	Savings (€/day)*	Savings (€/month)
LC	0,0425 +- 0,0636	1,32 +- 0,472
LCPH	-0,0106 +- 0,0366	-0,3274 +- 0,3156

*-results represent the average and more or less two times the standard deviation.

The values from the table 4 show that very small consumer savings can be achieved with the application of the studied load control strategies. In the case of LCPH the consumer can even lose some money. This is due to two combined factors: the first is that recovery effect can be higher than 100 % and the electricity prices during the pre-heating phase is not sufficiently low to compensate the higher energy consumption.

Discussion

The created methodology can be used to cast the effects that load control strategies can have on the load curve and on consumers comfort.

The two simulated strategies have shown the different physical effects on the building electric consumption.

The simple Load curtailment (LC) strategy will produce a lower recovery effect than for the Load curtailment with pre-heating (LCPH), taking into account the duration of the control application. However if we analyze the only the effects of overconsumption, the LCPH strategy will present a lower overconsumption, due to the fact that the building is more thermal charged. This means that the LCPH strategy is capable of shifting part of the energy during the peak price to the hour before and after and not only to the hour after (LC). The drawback of the LCPH is that, in terms of energy consumption, more energy will be consumed.

Nevertheless a careful choice of the control strategies should be made in order to prevent the creation of new power peaks. As it was explained before different peak consumptions will appear due to the loss of diversity in the thermostats commands. The peak power during the overconsumption and pre-heating phase reach the full-load if the exterior temperature is lower than 6°C. These power peaks create are the negative part of the load shift as they can create very high peak consumptions and lead eventually to the electric system failure.

The consumer results showed that almost no economic savings are achieved. Together with this phenomenon the discomfort caused by the application of the load control will result in zero incentive from the consumer point of view to apply a control strategy to his electric heaters.

This means that an exterior monetary incentive can be a necessary solution for consumer acceptance.

Conclusions

In this paper a methodology was developed to analyze the physical effects of load control as a function of a real time pricing tariff, known to customers on a day-ahead basis.

In order to create this methodology a building model was developed and a simulation scheme was created.

The results show the different physical effects and their value when simple demand response actions are applied to a group of buildings and individually.

The individual analysis showed that the application of the studied DR actions in average leads to non comfortable buildings.

The LCPH action provided a load shift from the daily peak hour to the hour before and after and a lower consumer discomfort. However the total energy spent, due to the pre-heating phase, causes that the total energy consumption of the control is close or higher to the energy savings during the daily peak hour.

The LC action presents an average lower recovery effect, than the LCPH strategy, of 64%. However the consumers discomfort is more affected.

Another important result was that insufficient monetary gains are obtained by consumers, for a simple control during one hour a day to accept it.

Perspectives

The created methodology can be used to study the impacts of more advanced controllers, like thermostat control optimization as a function of the electricity tariffs to obtain a maximum of monetary gains. These advanced controls can be then applied to study the effects of DR actions in reply to hour-ahead real-time-pricing.

A study about the control limits should also be made, i.e. which is allowed control time without affecting the thermal comfort?

References

- [ADEME 2006] *Les chiffres clés du bâtiment. Technical report, ADEME - Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Energie, 2006.*
- [Agneholm 2000] *E. Agneholm and J.Daalder. Cold load pick-up of residential load. IEE proceedings - Generation, transmission and Distribution, 147, 2000.*
- [DA SILVA 2010] *David Da Silva, Bruno Duplessis, Massimo Brancaccio and Jérôme Adnot. Room air conditioner load control under summer comfort constraint. Third international conference Palenc, 2010.*
- [Kyoung ho 2004] *Kyoung ho Lee and James E. Braun. Development and application of an inverse building model for demand response in small commercial buildings. IBPSA-USA national conference Boulder, 2004.*
- [Kyoung 2008] *Kyoung-ho Lee and James E. Braun . Model-based demand-limiting control of building thermal mass. Building and Environment, 43 (2008):1633–1646, 2008.*
- [Hazyuk 2010] *Ion Hazyuk, Christian Ghiaus and Dorin Isoc. Estimation optimale des charges de chauffage intermittent. IBPSA France, 2010.*

[Nathan 2001] Nathan Mendes, Gustavo H.C. Oliveira and Humberto X. de Araujo. Building thermal performance analysis by using matlab/simulink. Seventh international IBPSA Conference - Rio de Janeiro, Brazil, 2001.

[ORPHELIN 1999] Matthieu ORPHELIN. Méthodes pour la reconstitution de courbes de charge agrégées des usages thermiques de l'électricité. PhD thesis, May 1999.

[RTE 2009] RTE. Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en france. Technical report, Réseau de transport d'électricité, 2009.

[Srinivas 2006] Srinivas Katipamula and Ning Lu . Evaluation of residential hvac control strategies for demand response programs. ASHRAE Transactions, 2006.

[CLIP 2001] Jean-Pierre Traisnel. Habitat et développement durable - bilan rétrospectif et prospectif. Technical report, Club d'Ingénierie prospective Energie et Environnement (CLIP), 2001.

[Reddy 1991] T.A. Reddy, L. K. Norford and W. Kempton. Shaving residential air-conditioner electricity peaks by intelligent use of the building thermal mass. Energy, 16(7):1001–1010, 1991.

[Wang 2006] Shengwei Wang and Xinhua Xu. Simplified building model for transient thermal performance estimation using ga-based parameter identification. International journal of Thermal Sciences, 45:419–432, 2006.

ANNEXE IV – Analyse de la réponse des parois décrites en 3.3.1.1 en fréquence et à un échelon de température

Paroi 2 – Diagramme de Bode et réponses à un échelon de température en échelon

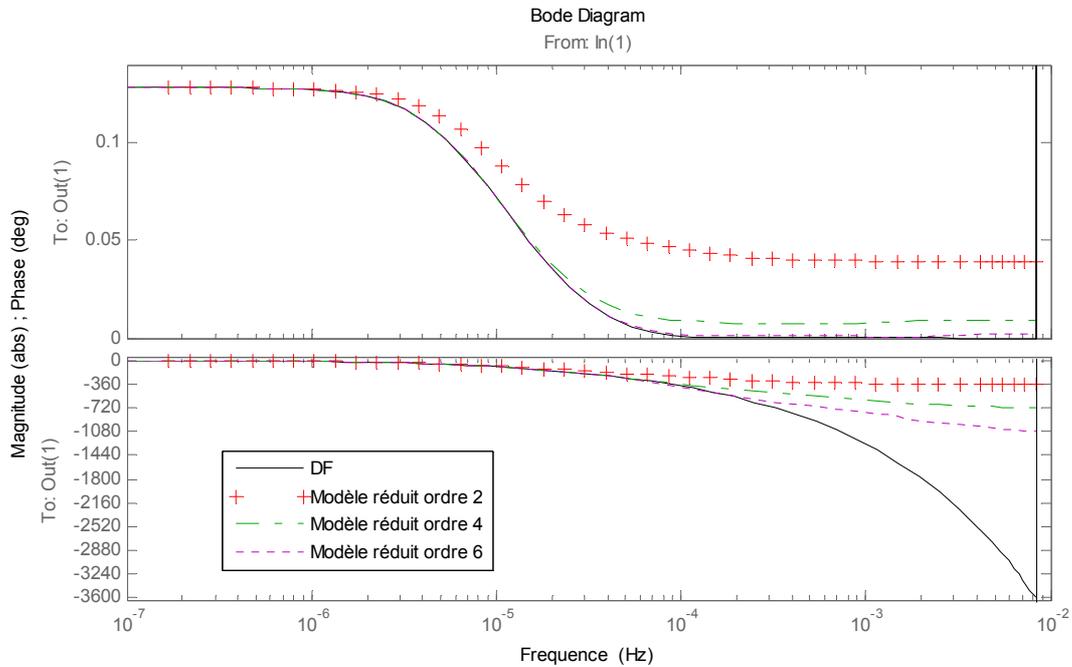


Figure 1 - influence de la T_{ext} en T_{SI} – Paroi-2

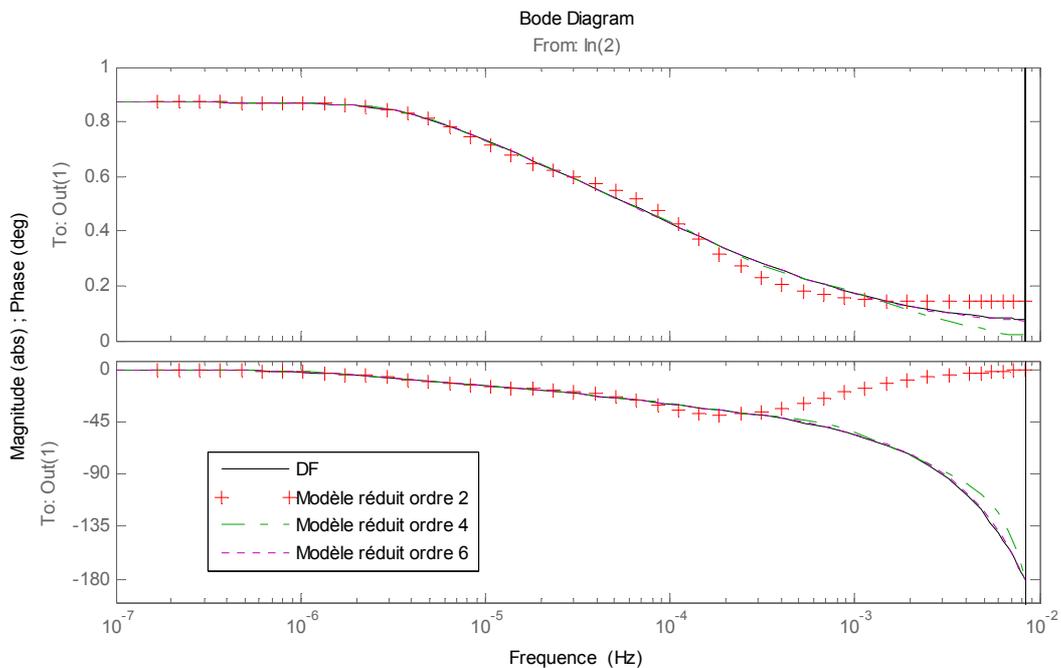


Figure 2 - influence de la T_{int} en T_{SI} – Paroi-2

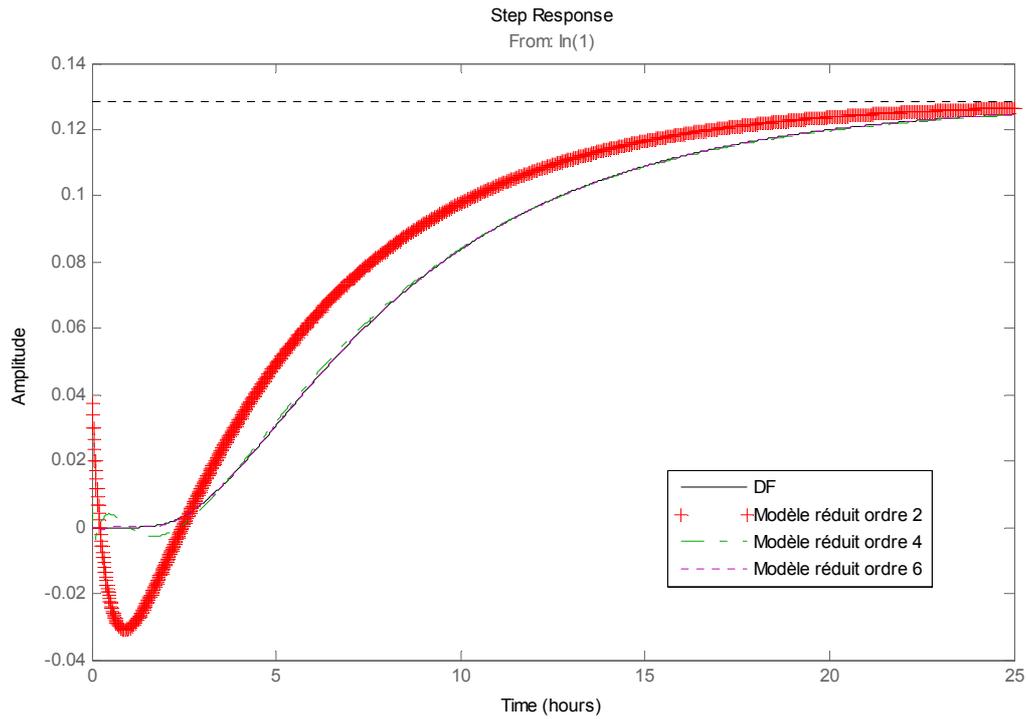


Figure 3 – Réponse de la Paroi-2 à un échelon de température extérieure

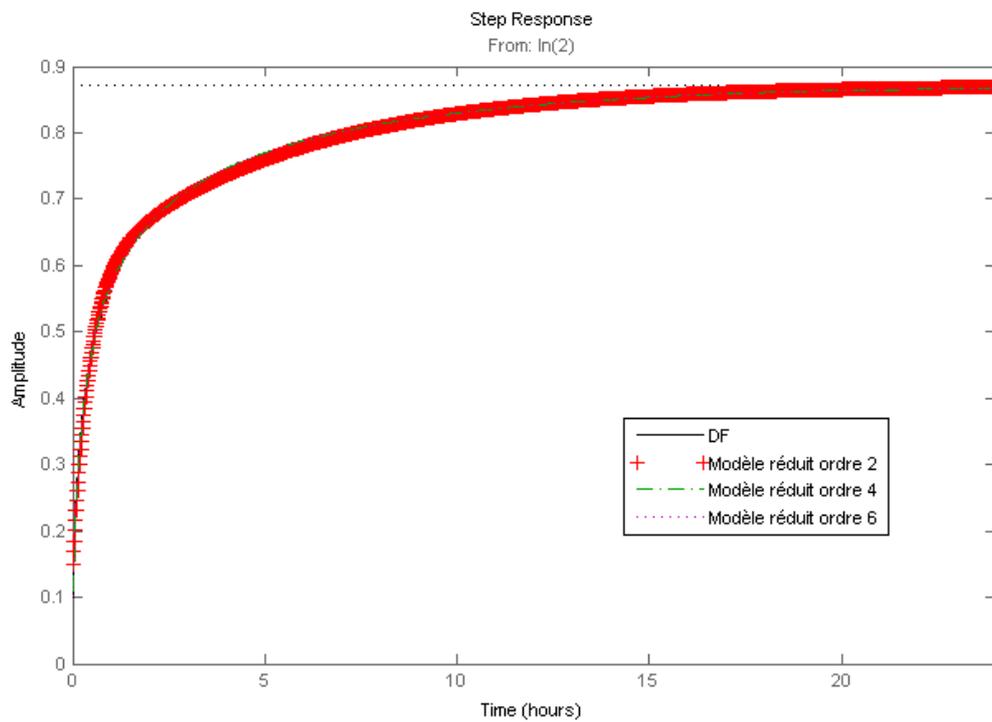


Figure 4 – Réponse de la Paroi-2 à un échelon de température intérieure

Paroi 3 – Diagramme de Bode et réponses échelon de température

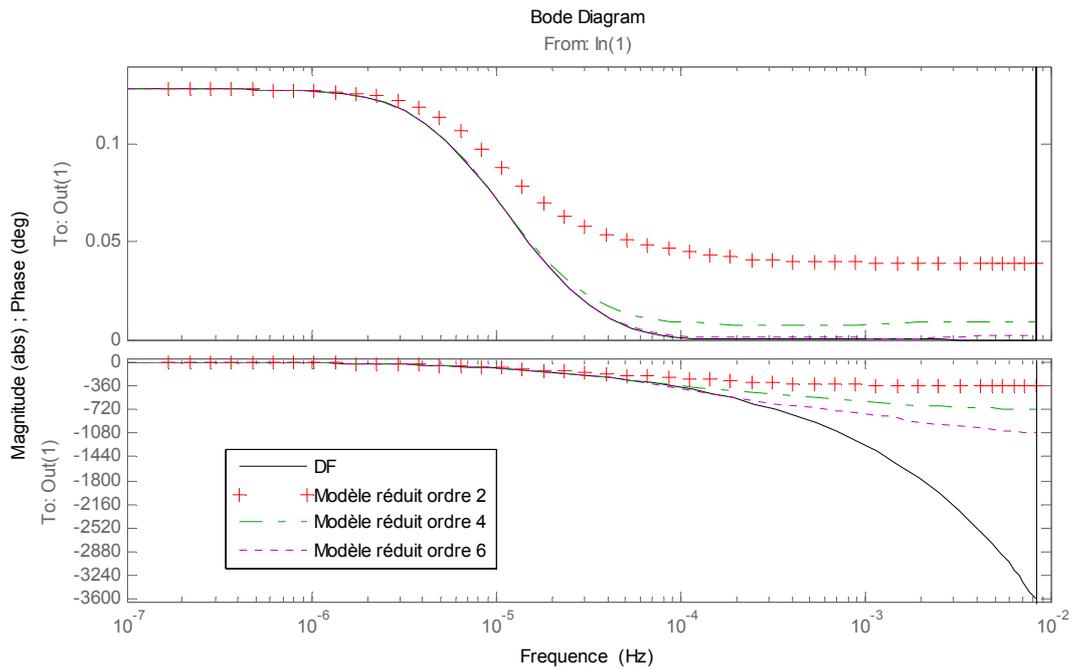


Figure 5 - influence de la T_{ext} en T_{SI} – Paroi-3

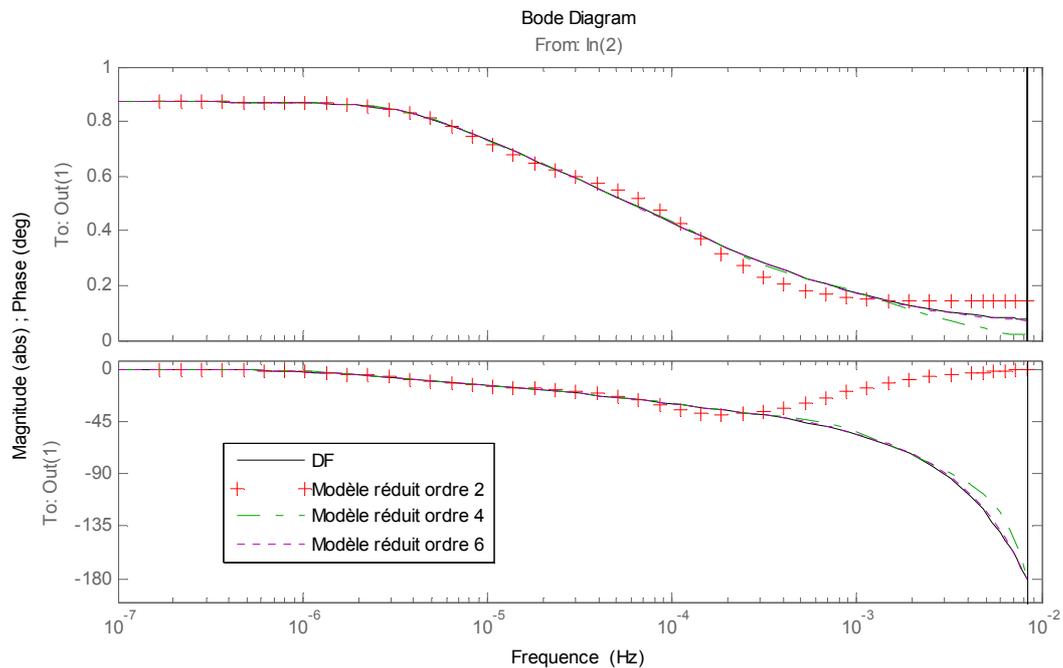


Figure 6 - influence de la T_{int} en T_{SI} – Paroi-3

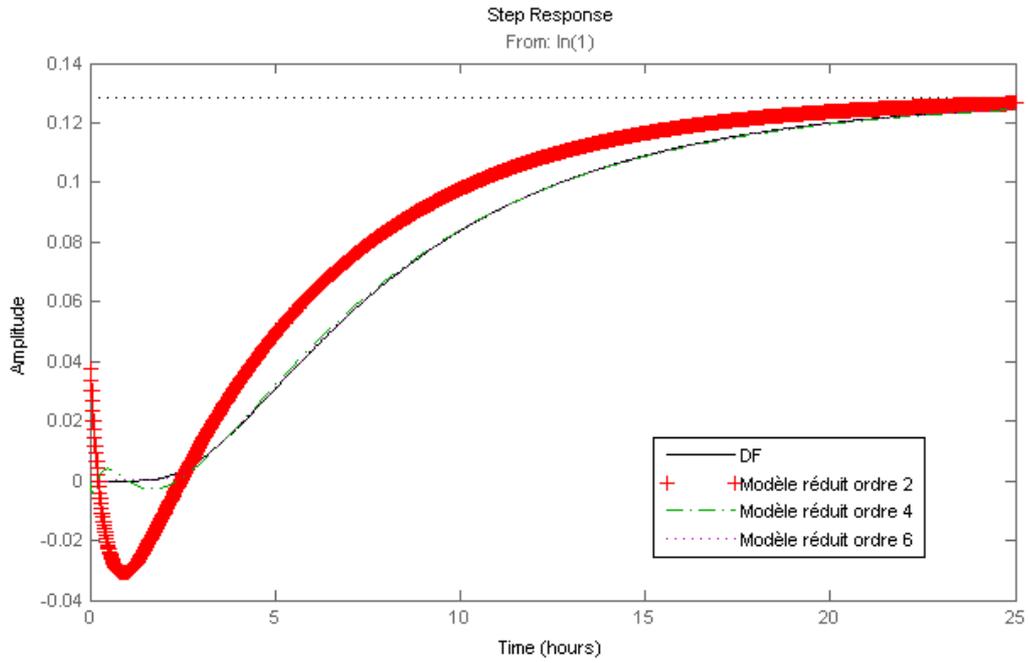


Figure 7 – Réponse de la Paroi-2 à un échelon de température extérieure

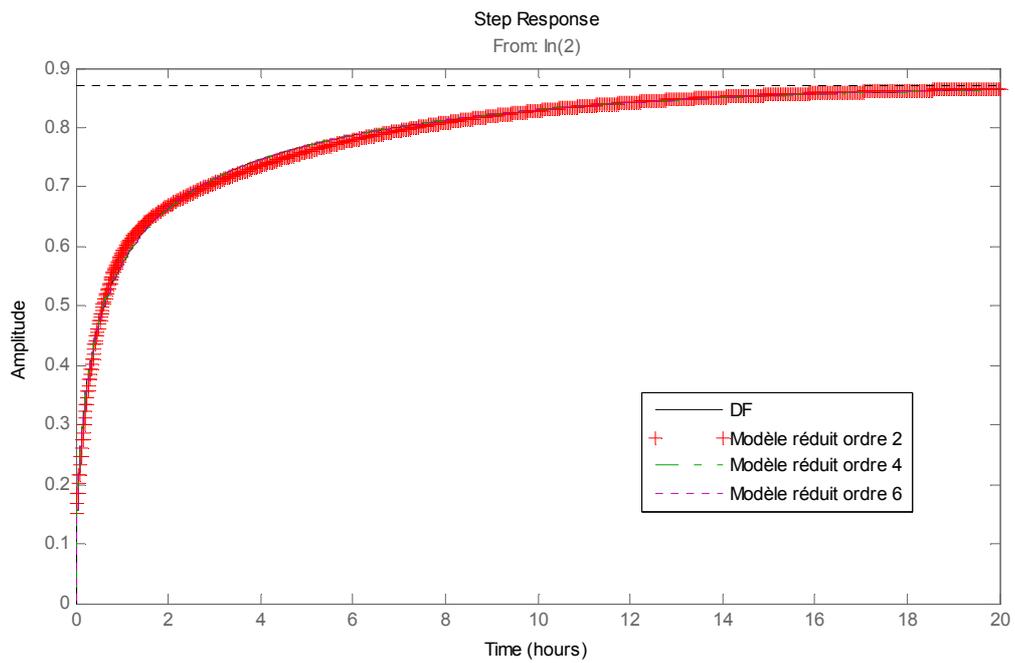


Figure 8 – Réponse de la Paroi-3 à un échelon de température intérieure

ANNEXE V – Résultats détaillés des stratégies de contrôle

Coupure simple

- Analyse énergétique

Tableau 1 – Analyse du recouvrement pour la coupure simple – maison individuelle

Recouvrement	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	33%	25%	21%	38%	45%
max	65%	77%	86%	81%	81%
moyenne	52%	57%	62%	67%	70%
σ	7%	9%	11%	7%	6%

Tableau 2 – Analyse de l'impact énergétique pour la coupure simple – maison individuelle

Impact énergétique [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	3,47	2,66	2,32	1,87	1,68
max	9,35	7,34	6,33	5,31	4,88
moyenne	5,78	4,70	3,79	3,20	2,94
σ	1,19	1,05	0,91	0,79	0,75

Tableau 3 – Analyse de la surconsommation pour la coupure simple – maison individuelle

Surconsommation [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	2,14	1,73	1,28	1,35	1,23
max	3,56	3,60	3,02	2,65	2,56
moyenne	2,95	2,61	2,28	2,11	2,03
σ	0,38	0,40	0,41	0,32	0,35

Tableau 4 – Analyse du temps à pleine puissance pour la coupure simple – maison individuelle

Temps à pleine puissance [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	44,0	47,0	50,0	41,0	39,0
max	240,0	421,0	601,0	488,0	448,0
moyenne	87,7	105,8	125,3	103,2	99,0
σ	36,3	60,4	100,5	71,8	65,9

Tableau 5 – Analyse du recouvrement pour la coupure simple – Appartement

Recouvrement	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	50%	50%	44%	65%	67%
max	92%	110%	102%	93%	93%
moyenne	70%	78%	78%	81%	82%
σ	10%	13%	12%	5%	4%

Tableau 6 – Analyse de l'impact énergétique pour la coupure simple – Appartement

Impact énergétique [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	1,43	1,45	1,14	0,94	0,88
max	5,38	4,65	4,40	3,58	3,34
moyenne	3,00	2,80	2,35	1,98	1,84
σ	0,89	0,83	0,71	0,60	0,58

Tableau 7 – Analyse de la surconsommation pour la coupure simple – Appartement

Surconsommation [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,77	0,85	0,97	0,79	0,73
max	3,24	3,45	2,50	2,32	2,34
moyenne	2,09	2,14	1,78	1,58	1,50
σ	0,58	0,53	0,40	0,40	0,41

Tableau 8 – Analyse du temps à pleine puissance pour la coupure simple – Appartement

Temps à pleine puissance [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	35,0	39,0	40,0	26,0	24,0
max	361,0	470,0	585,0	329,0	269,0
moyenne	95,3	103,7	111,2	80,7	74,9
σ	56,2	70,2	89,0	51,4	44,7

- Analyse confort thermique

Tableau 9 – Analyse du temps hors confort pour la coupure simple – maison individuelle

Temps hors confort [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	105,0	75,0	46,0	7,0	0,0
max	721,0	650,0	621,0	449,0	385,0
moyenne	374,5	193,2	165,3	127,4	110,6
σ	219,7	109,2	96,2	77,8	74,4

Tableau 10 – Analyse des degrés heures d'inconfort pour la coupure simple – maison individuelle

Degré heures d'inconfort	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	2,19	0,92	0,28	0,01	0,00
max	35,86	27,37	26,32	17,82	14,58
moyenne	10,24	6,90	5,15	3,18	2,47
σ	6,85	5,01	4,79	3,42	2,89

Tableau 11 – Analyse du temps hors confort pour la coupure simple – Appartement

Temps hors confort [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
max	311,0	325,0	316,0	235,0	205,0
moyenne	91,9	80,8	62,0	35,9	28,5
σ	68,9	69,8	69,3	53,6	46,7

Tableau 12 – Analyse des degrés heures d'inconfort pour la coupure simple – Appartement

Degré heures d'inconfort	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
max	13,03	12,52	9,71	5,44	4,20
moyenne	2,09	1,62	1,02	0,46	0,33
σ	2,70	2,37	1,82	1,00	0,77

Coupure sans inconfort

- Analyse énergétique

Tableau 13 – Analyse de l'impact énergétique pour la coupure avec arrêt ventilation – maison individuelle

Impact énergétique [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,00	0,00	0,17	0,62	0,64
max	1,25	1,58	1,68	1,82	1,87
moyenne	0,41	0,79	0,99	1,23	1,33
σ	0,38	0,38	0,39	0,29	0,28

Tableau 14 – Analyse de la surconsommation pour la coupure avec arrêt ventilation – maison individuelle

Surconsommation [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,00	0,00	0,00	0,57	0,54
max	1,43	1,30	1,45	1,35	1,53
moyenne	0,38	0,65	0,82	1,03	1,12
σ	0,38	0,36	0,34	0,20	0,22

Tableau 15 – Analyse du temps à pleine puissance pour la coupure avec arrêt ventilation – maison individuelle

Temps à pleine puissance [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
max	37,00	30,00	57,00	52,00	63,00
moyenne	5,32	11,93	13,77	8,04	4,98
σ	7,32	10,68	19,17	17,60	16,25

Tableau 16 – Analyse de l'impact énergétique pour la coupure avec arrêt ventilation – Appartement

Impact énergétique [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,82	0,65	1,01	1,26	1,42
max	2,47	2,35	2,41	2,36	2,38
moyenne	1,56	1,71	1,73	1,86	1,91
σ	0,32	0,35	0,34	0,25	0,24

Tableau 17 – Analyse de la surconsommation pour la coupure avec arrêt ventilation – Appartement

Surconsommation [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,77	0,75	0,68	1,02	1,19
max	2,03	2,00	2,11	1,77	1,76
moyenne	1,25	1,39	1,42	1,51	1,54
σ	0,29	0,30	0,36	0,15	0,15

Tableau 18 – Analyse du temps à pleine puissance pour la coupure avec arrêt ventilation – Appartement

Temps à pleine puissance [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
max	51,0	45,0	70,0	65,0	64,0
moyenne	10,0	10,8	25,8	21,3	18,3
σ	11,8	12,1	20,3	21,1	20,6

Coupure avec condition de bande morte

- Analyse énergétique

Tableau 19 – Analyse du recouvrement pour la coupure avec condition d'effacement – maison individuelle

Recouvrement	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	33%	26%	21%	39%	46%
max	65%	78%	87%	81%	83%
moyenne	53%	58%	63%	68%	71%
σ	7%	9%	12%	7%	6%

Tableau 20 – Analyse de l'impact énergétique pour la coupure avec condition d'effacement – maison individuelle

Impact énergétique [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	3,38	2,66	2,27	1,87	1,68
max	9,35	7,27	6,27	5,26	4,83
moyenne	5,73	4,65	3,77	3,18	2,92
σ	1,19	1,04	0,91	0,78	0,74

Tableau 21 – Analyse de la surconsommation pour la coupure avec condition d'effacement – maison individuelle

Surconsommation [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	2,14	1,73	1,28	1,35	1,23
max	3,56	3,60	3,02	2,65	2,56
moyenne	2,95	2,61	2,28	2,11	2,03
σ	0,38	0,40	0,41	0,32	0,34

Tableau 22 – Analyse du temps à pleine puissance pour la coupure avec condition d'effacement – maison individuelle

Temps à pleine puissance [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	43,0	47,0	48,0	40,0	38,0
max	252,0	426,0	584,0	490,0	448,0
moyenne	86,8	103,4	120,7	102,3	97,8
σ	37,4	61,1	94,1	71,9	65,6

Tableau 23 – Analyse du recouvrement pour la coupure avec condition d'effacement – Appartement

Recouvrement	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	50%	50%	45%	66%	67%
max	92%	114%	102%	93%	93%
moyenne	71%	79%	79%	82%	83%
σ	10%	13%	12%	5%	4%

Tableau 24 – Analyse de l'impact énergétique pour la coupure avec condition d'effacement – Appartement

Impact énergétique [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	1,43	1,45	1,10	0,91	0,84
max	5,38	4,65	4,36	3,54	3,30
moyenne	2,98	2,78	2,33	1,96	1,83
σ	0,88	0,83	0,70	0,60	0,58

Tableau 25 – Analyse de la surconsommation pour la coupure avec condition d'effacement – Appartement

Surconsommation [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,77	0,85	0,97	0,79	0,73
max	3,24	3,45	2,50	2,32	2,34
moyenne	2,09	2,14	1,78	1,58	1,50
σ	0,58	0,53	0,40	0,40	0,41

Tableau 26 – Analyse du temps à pleine puissance pour la coupure avec condition d'effacement – Appartement

Temps à pleine puissance [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	36,0	36,0	35,0	27,0	25,0
max	355,0	481,0	568,0	329,0	270,0
moyenne	91,5	99,6	106,7	79,7	73,7
σ	55,0	71,8	95,1	51,5	44,5

- Analyse confort thermique

Tableau 27 – Analyse du temps hors confort pour la coupure avec condition d'effacement – maison individuelle

Temps hors confort [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	105,0	73,0	38,0	5,0	0,0
max	721,0	629,0	615,0	452,0	385,0
moyenne	368,4	183,2	153,4	124,7	107,6
σ	221,4	109,3	97,5	78,3	74,1

Tableau 28 – Analyse des degrés heures d'inconfort pour la coupure avec condition d'effacement – maison individuelle

Degré heures d'inconfort	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	2,19	0,89	0,19	0,00	0,00
max	34,30	26,65	25,61	17,60	14,52
moyenne	9,75	6,30	4,52	3,07	2,37
σ	6,70	4,93	4,53	3,38	2,85

Tableau 29 – Analyse du temps hors confort pour la coupure avec condition d'effacement – Appartement

Temps hors confort [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
max	302,0	332,0	308,0	234,0	202,0
moyenne	80,4	69,1	49,8	34,4	26,3
σ	66,0	68,8	66,3	52,8	45,2

Tableau 30 – Analyse des degrés heures d'inconfort pour la coupure avec condition d'effacement – Appartement

Degré heures d'inconfort	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
max	12,27	11,60	8,74	5,38	4,10
moyenne	1,71	1,31	0,79	0,44	0,30
σ	2,40	2,13	1,59	0,99	0,74

Coupure avec arrêt ventilation

- Analyse énergétique

Tableau 31 – Analyse du recouvrement pour la coupure avec arrêt ventilation – maison individuelle

Recouvrement	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	33%	25%	21%	38%	45%
max	66%	69%	86%	72%	76%
moyenne	51%	55%	60%	63%	66%
σ	7%	8%	11%	6%	6%

Tableau 32 – Analyse de l'impact énergétique pour la coupure avec arrêt ventilation – maison individuelle

Impact énergétique [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	3,47	2,66	2,32	1,87	1,68
max	9,35	7,34	6,33	5,31	4,88
moyenne	5,78	4,70	3,79	3,20	2,94
σ	1,19	1,05	0,91	0,79	0,75

Tableau 33 – Analyse de la surconsommation pour la coupure avec arrêt ventilation – maison individuelle

Surconsommation [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	1,78	1,73	1,16	1,25	1,18
max	3,56	3,31	2,96	2,55	2,47
moyenne	2,87	2,52	2,21	1,98	1,90
σ	0,39	0,39	0,41	0,31	0,34

Tableau 34 – Analyse du temps à pleine puissance pour la coupure avec arrêt ventilation – maison individuelle

Temps à pleine puissance [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	43,0	45,0	51,0	38,0	36,0
max	236,0	413,0	601,0	468,0	424,0
moyenne	85,8	102,5	121,2	97,2	92,6
σ	35,6	58,6	100,6	67,7	61,4

Tableau 35 – Analyse du recouvrement pour la coupure avec arrêt ventilation – Appartement

Recouvrement	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	44%	38%	44%	63%	61%
max	85%	105%	94%	80%	79%
moyenne	65%	71%	69%	72%	72%
σ	9%	13%	10%	4%	4%

Tableau 36 – Analyse de l'impact énergétique pour la coupure avec arrêt ventilation –Appartement

Impact énergétique [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	1,43	1,45	1,14	0,94	0,88
max	5,38	4,65	4,40	3,58	3,34
moyenne	3,00	2,80	2,35	1,98	1,84
σ	0,89	0,83	0,71	0,60	0,58

Tableau 37 – Analyse de la surconsommation pour la coupure avec arrêt ventilation – Appartement

Surconsommation [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,82	0,65	0,80	0,67	0,61
max	3,24	3,25	2,37	2,24	2,15
moyenne	1,94	1,97	1,60	1,42	1,32
σ	0,58	0,55	0,42	0,37	0,40

Tableau 38 –Analyse du temps à pleine puissance pour la coupure avec arrêt ventilation – Appartement

Temps à pleine puissance [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	33,0	33,0	36,0	22,0	21,0
max	334,0	426,0	554,0	284,0	230,0
moyenne	90,0	96,4	102,0	72,0	66,2
σ	52,3	64,2	81,9	45,9	39,7

- Analyse confort thermique

Tableau 39 – Analyse du temps hors confort pour la coupure avec arrêt ventilation – maison individuelle

Temps hors confort [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	102,0	70,0	44,0	0,0	0,0
max	721,0	649,0	608,0	425,0	355,0
moyenne	372,8	188,3	158,3	117,4	99,8
σ	220,6	107,2	94,0	76,5	72,2

Tableau 40 – Analyse des degrés heures d'inconfort pour la coupure avec arrêt ventilation – maison individuelle

Degrée heures d'inconfort	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	2,02	0,77	0,27	0,00	0,00
max	34,91	26,01	24,53	15,97	12,79
moyenne	9,86	6,42	4,64	2,69	2,04
σ	6,66	4,74	4,48	3,08	2,55

Tableau 41 – Analyse du temps hors confort pour la coupure avec arrêt ventilation – Appartement

Temps hors confort [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
max	288,0	286,0	293,0	206,0	174,0
moyenne	82,7	68,5	48,7	25,7	18,9
σ	67,7	66,2	63,9	45,5	38,0

Tableau 42 – Analyse des degrés heures d'inconfort pour la coupure avec arrêt ventilation – Appartement

Degrée heures d'inconfort	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
max	10,77	9,15	7,93	3,97	2,89
moyenne	1,74	1,23	0,72	0,28	0,18
σ	2,32	1,92	1,45	0,71	0,51

Coupure avec préchauffage

- Analyse énergétique

Tableau 43 – Analyse du recouvrement pour la coupure avec préchauffage – maison individuelle

Recouvrement	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	54%	42%	39%	55%	60%
max	102%	113%	124%	125%	124%
moyenne	79%	85%	92%	98%	101%
σ	10%	15%	17%	13%	13%

Tableau 44 – Analyse de l'impact énergétique pour la coupure avec préchauffage – maison individuelle

Impact énergétique [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	3,47	2,66	2,32	1,87	1,68
max	9,35	7,34	6,33	5,31	4,88
moyenne	5,78	4,70	3,79	3,20	2,94
σ	1,19	1,05	0,91	0,79	0,75

Tableau 45 – Analyse de la surconsommation pour la coupure avec préchauffage – maison individuelle

Surconsommation [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	2,85	2,88	2,50	2,24	2,07
max	5,25	4,97	4,24	3,69	3,55
moyenne	4,47	3,88	3,35	3,05	2,89
σ	0,47	0,45	0,39	0,35	0,38

Tableau 46 – Analyse du temps à pleine puissance pendant le préchauffage - coupure avec préchauffage – maison individuelle

Temps à pleine puissance [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	22,0	28,0	35,0	35,0	37,0
max	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
moyenne	42,4	55,0	67,0	60,1	61,3
σ	18,8	22,9	22,6	22,3	21,4

Tableau 47 – Analyse du temps à pleine puissance après la coupure - coupure avec préchauffage – maison individuelle

Temps à pleine puissance [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	39,0	36,0	32,0	22,0	20,0
max	227,0	402,0	601,0	450,0	404,0
moyenne	80,5	93,0	107,5	79,3	73,5
σ	35,0	57,6	103,2	65,1	59,6

Tableau 48 – Analyse du recouvrement pour la coupure avec préchauffage – Appartement

Recouvrement	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	68%	56%	60%	82%	84%
max	150%	146%	150%	146%	143%
moyenne	103%	101%	106%	114%	115%
σ	16%	15%	18%	13%	13%

Tableau 49 – Analyse de l'impact énergétique pour la coupure avec préchauffage – Appartement

Impact énergétique [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	1,43	1,45	1,14	0,94	0,88
max	5,38	4,65	4,40	3,58	3,34
moyenne	3,00	2,80	2,35	1,98	1,84
σ	0,89	0,83	0,71	0,60	0,58

Tableau 50 – Analyse de la surconsommation pour la coupure avec préchauffage – Appartement

Surconsommation [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	1,59	1,55	1,56	1,34	1,27
max	4,56	4,20	3,30	2,95	2,91
moyenne	2,98	2,76	2,39	2,18	2,05
σ	0,62	0,64	0,47	0,41	0,44

Tableau 51 – Analyse du temps à pleine puissance pendant le préchauffage - coupure avec préchauffage – Appartement

Temps à pleine puissance [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	34,0	38,0	46,0	44,0	44,0
max	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
moyenne	60,8	67,1	80,6	68,7	68,1
σ	20,8	21,4	22,2	19,7	18,7

Tableau 52 – Analyse du temps à pleine puissance après la coupure - coupure avec préchauffage – Appartement

Temps à pleine puissance [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	19,0	22,0	17,0	4,0	4,0
max	308,0	416,0	535,0	231,0	197,0
moyenne	71,1	76,5	73,5	43,4	37,2
σ	49,3	61,4	79,5	41,4	36,2

- Analyse confort thermique

Tableau 53 – Analyse du temps hors confort pour la coupure avec préchauffage – maison individuelle

Temps hors confort [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	76,0	26,0	0,0	0,0	0,0
max	716,0	635,0	571,0	388,0	321,0
moyenne	349,4	153,8	111,1	69,8	53,1
σ	225,1	113,4	94,9	74,9	66,4

Tableau 54 – Analyse des degrés heures d'inconfort pour la coupure avec préchauffage – maison individuelle

Degré heures d'inconfort	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	1,25	0,11	0,00	0,00	0,00
max	30,83	23,37	21,09	13,80	10,97
moyenne	8,03	4,56	2,90	1,42	0,97
σ	6,20	4,34	3,81	2,46	1,92

Tableau 55 – Analyse du temps hors confort pour la coupure avec préchauffage – Appartement

Temps hors confort [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
max	254,0	268,0	265,0	151,0	112,0
moyenne	40,9	31,4	20,7	7,0	4,0
σ	55,0	54,2	48,3	25,3	17,8

Tableau 56 – Analyse des degrés heures d'inconfort pour la coupure avec préchauffage – Appartement

Degré heures d'inconfort	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
max	8,39	8,15	6,61	2,25	1,25
moyenne	0,72	0,52	0,29	0,07	0,03
σ	1,46	1,34	1,03	0,33	0,18

Passage en mode-éco

- *Analyse énergétique*

Tableau 57 – Analyse du recouvrement pour Le passage en mode-éco – maison individuelle

Recouvrement	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	19%	21%	29%	59%	59%
max	81%	105%	100%	79%	82%
moyenne	56%	57%	65%	69%	73%
σ	15%	17%	17%	5%	5%

Tableau 58 – Analyse de l'impact énergétique pour le passage en mode-éco – maison individuelle

Impact énergétique [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	1,25	1,15	1,16	1,35	1,28
max	2,32	2,23	2,32	1,61	1,58
moyenne	1,78	1,69	1,62	1,50	1,46
σ	0,26	0,24	0,25	0,06	0,07

Tableau 59 – Analyse de la surconsommation pour le passage en mode-éco – maison individuelle

Surconsommation [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,27	0,29	0,35	0,88	0,94
max	1,69	1,66	1,74	1,20	1,23
moyenne	1,01	0,95	1,05	1,03	1,06
σ	0,33	0,31	0,29	0,07	0,06

Tableau 60 – Analyse du temps à pleine puissance pour le passage en mode-éco – maison individuelle

Temps à pleine puissance [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	19,0	23,0	32,0	30,0	31,0
max	89,0	163,0	212,0	145,0	134,0
moyenne	32,3	44,4	58,5	46,7	47,4
σ	11,2	21,4	29,0	18,4	17,8

Tableau 61 – Analyse du recouvrement pour le passage en mode-éco – Appartement

Recouvrement	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	40%	38%	35%	72%	74%
max	114%	114%	116%	96%	96%
moyenne	73%	76%	75%	82%	85%
σ	17%	16%	17%	5%	4%

Tableau 62 – Analyse de l'impact énergétique pour le passage en mode-éco – Appartement

Impact énergétique [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,77	0,90	0,97	0,91	0,88
max	2,09	1,95	2,07	1,54	1,57
moyenne	1,49	1,50	1,48	1,37	1,34
σ	0,25	0,25	0,29	0,12	0,16

Tableau 63 – Analyse de la surconsommation pour le passage en mode-éco – Appartement

Surconsommation [kWh]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,49	0,35	0,38	0,79	0,73
max	1,59	1,90	1,61	1,34	1,34
moyenne	1,09	1,14	1,09	1,12	1,13
σ	0,28	0,31	0,27	0,11	0,13

Tableau 64 – Analyse du temps à pleine puissance POUR Le passage en mode-éco – Appartement

Temps à pleine puissance [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	30,0	32,0	40,0	26,0	24,0
max	114,0	167,0	217,0	133,0	120,0
moyenne	50,7	55,4	68,6	53,1	52,5
σ	18,0	20,8	29,4	17,8	16,5

- Analyse confort thermique

Tableau 65 – Analyse du temps hors confort pour le passage en mode-éco- maison individuelle

Temps hors confort [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	80,0	25,0	2,0	0,0	0,0
max	721,0	632,0	310,0	186,0	159,0
moyenne	342,1	131,6	89,6	48,8	36,3
σ	229,7	106,4	57,4	52,9	48,1

Tableau 66 – Analyse des degrés heures d'inconfort pour le passage en mode-éco – maison individuelle

Degrée heures d'inconfort	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,40	0,04	0,00	0,00	0,00
max	16,84	7,52	3,96	2,32	1,69
moyenne	3,67	1,31	0,77	0,29	0,18
σ	3,46	1,35	0,85	0,48	0,36

Tableau 67 – Analyse du temps hors confort pour le passage en mode-éco – Appartement

Temps hors confort [min]	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
max	127,0	112,0	125,0	62,0	19,0
moyenne	20,8	11,3	11,1	1,2	0,3
σ	33,7	22,9	24,7	8,2	2,5

Tableau 68 – Analyse des degrés heures d'inconfort pour le passage en mode-éco – Appartement

Degrée heures d'inconfort	Avant 75	RT 75	RT 89	RT 2000	RT 2005
min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
max	0,87	0,65	0,67	0,07	0,01
moyenne	0,08	0,04	0,03	0,00	0,00
σ	0,18	0,11	0,11	0,01	0,00

Analyse de la flexibilité des usages électriques résidentiels

RESUME : Au-delà de l'augmentation de la consommation de l'électricité, on observe dans le même temps que les consommations pendant les périodes de pointe deviennent de plus en plus fréquentes et de plus forte intensité. Pour faire face à cette problématique, la présente thèse exploite la flexibilité que peuvent apporter au système électrique les différents usages électriques résidentiels

Dans un premier temps, le potentiel des différents équipements pour la gestion de la demande est évalué en termes d'impact sur la consommation et d'appels de puissance caractéristiques de chaque équipement.

Dans un deuxième temps, une méthodologie basée sur un langage graphique est proposée pour repérer les possibles stratégies de contrôle. Cette méthodologie va permettre de définir l'ensemble des stratégies de contrôle applicables à un équipement et de voir de quelle façon un équipement ordinaire peut être modifié pour devenir « intelligent » (« Smart Appliance »).

Ensuite, une méthodologie est développée pour analyser les différents impacts (positifs et négatifs) selon deux objectifs différents: le contrôle à distance et le contrôle en fonction des tarifs. Cette méthodologie permet de caractériser les effets positifs résultants de l'application d'une stratégie de contrôle donnée, en termes de puissance et énergie, mais aussi ses effets négatifs, les impacts sur le confort thermique et le possible recouvrement par le bâtiment ou l'équipement de l'énergie qu'il n'a pas consommée (cas des usages thermiques).

Enfin, cette méthodologie est appliquée à plus grande échelle (plusieurs bâtiments) pour quantifier la flexibilité apportée au réseau. Les contrôles seront analysés du point de vue du réseau électrique, mais aussi du point de vue du consommateur (par l'intermédiaire des gains ou pertes monétaires et de confort).

Mots clés : *Gestion de la demande, Simulation thermique dynamique, Langage graphique, Effacement électrique*

Analytical study of household electricity demand flexibility

ABSTRACT: Together with the increasing electric consumption, the peak periods are becoming more frequent and with higher amplitudes. In response to this problem, this thesis studies the flexibility that household appliances can provide to the electric system.

Firstly, the potential of equipment in terms of demand side management is evaluated, taking into account the global consumption and its load characteristics

A methodology, based on a graphical language, is created in order to determine the possible control strategies to be applied to the equipment. This methodology makes possible to discern, which modifications should be made, to transform ordinary equipment into "Smart Appliances".

Next, a methodology is developed to analyze the different impacts of the control strategies, for direct load control and demand response actions generated by tariffs. This methodology evaluates the positive impacts of the load control, in terms of power and energy, but also its negative impacts.

The methodology is then applied to a group of buildings in order to determine the flexibility added to the electric grid. The control strategies impacts are also analyzed from the consumer point of view in terms of comfort losses and monetary gains/losses.

Keywords : *Demand Response, Load Curtailment, Graphical language, Building Simulation*