

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

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 Off<sup>4</sup> et Standby<sup>1</sup>.

## **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

---

<sup>1</sup> et <sup>4</sup> - 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*<sup>5</sup> » ou le « *Critical peak Pricing*<sup>6</sup> ». 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-

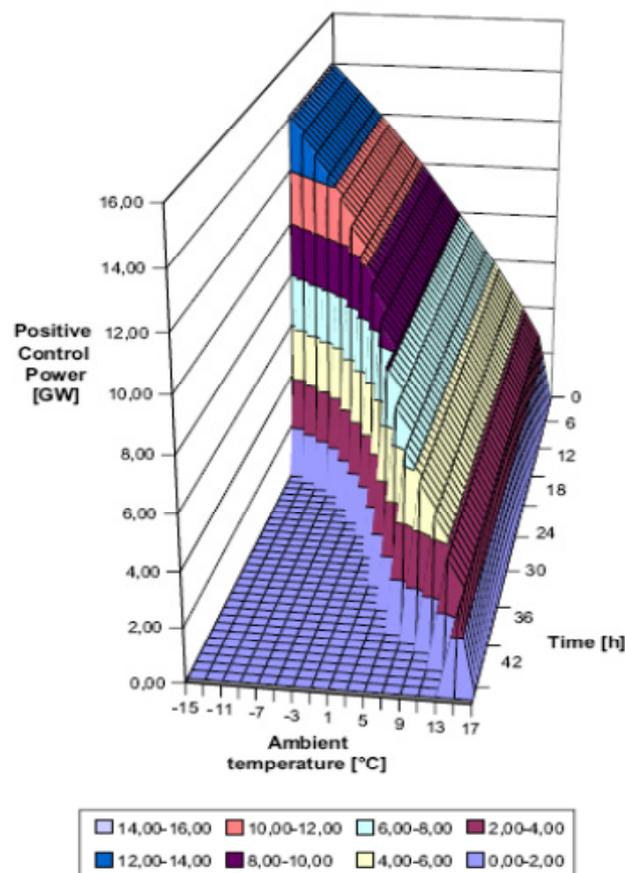
---

<sup>5</sup> - « 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].

<sup>6</sup> - « 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

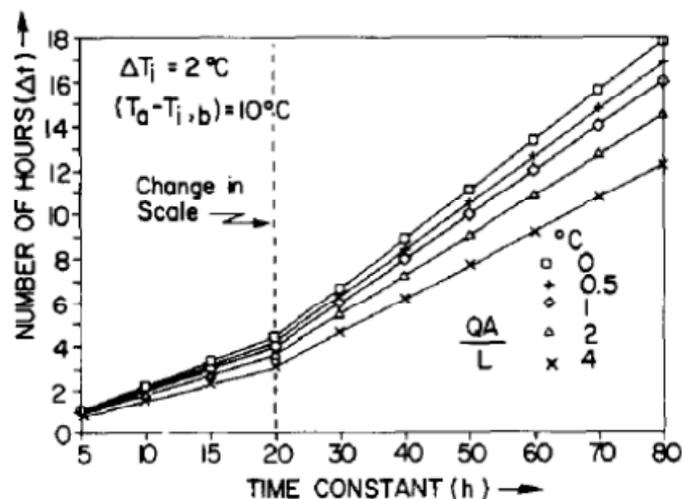
T<sub>i</sub>(t) - température interne

T<sub>a</sub>(t) - Température extérieure

Q<sub>a</sub>(t) - Somme de tous les gains internes

Q<sub>c</sub>(t) - Energie thermique enlevée par le climatiseur

Prenant en compte que la constante de temps du bâtiment ( $\tau$ ) 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  $2^\circ\text{C}$  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-rafraîchissement du bâtiment, ils analysent différentes stratégies de régulation des consignes pendant les heures de pointe (tarification « *TOU pricing* »<sup>7</sup>).

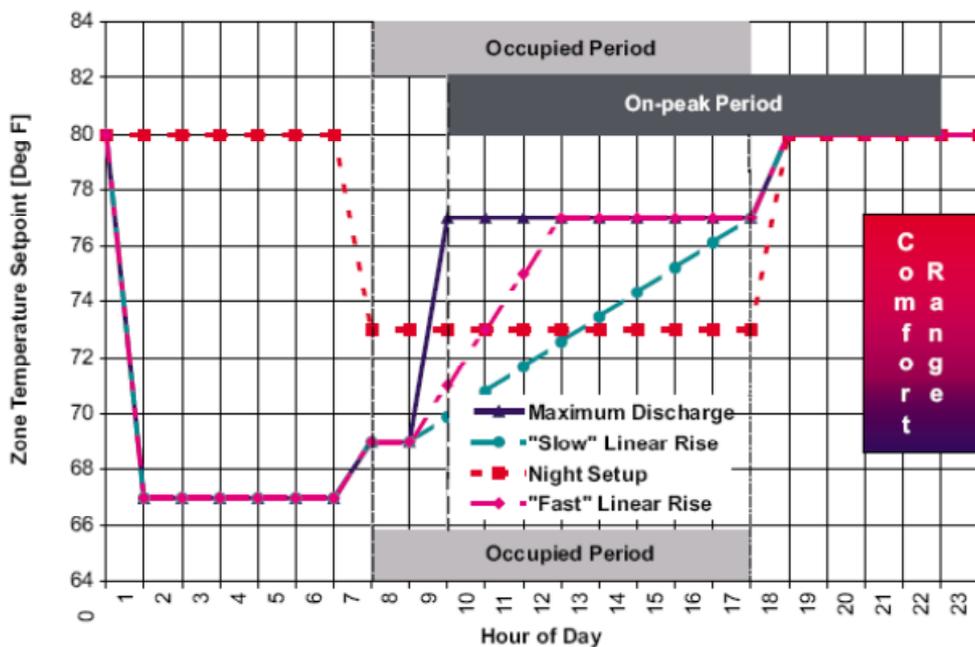
Les simulations dynamiques sont réalisées selon la méthode décrite par Seem [Seem, 1987]. La méthode est basée sur des fonctions de transfert pour décrire le comportement thermique d'un bâtiment voire une pièce. Les coefficients des fonctions de transfert peuvent être estimés à partir de techniques de 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 rafraîchissement 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.

<sup>7</sup> - 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.



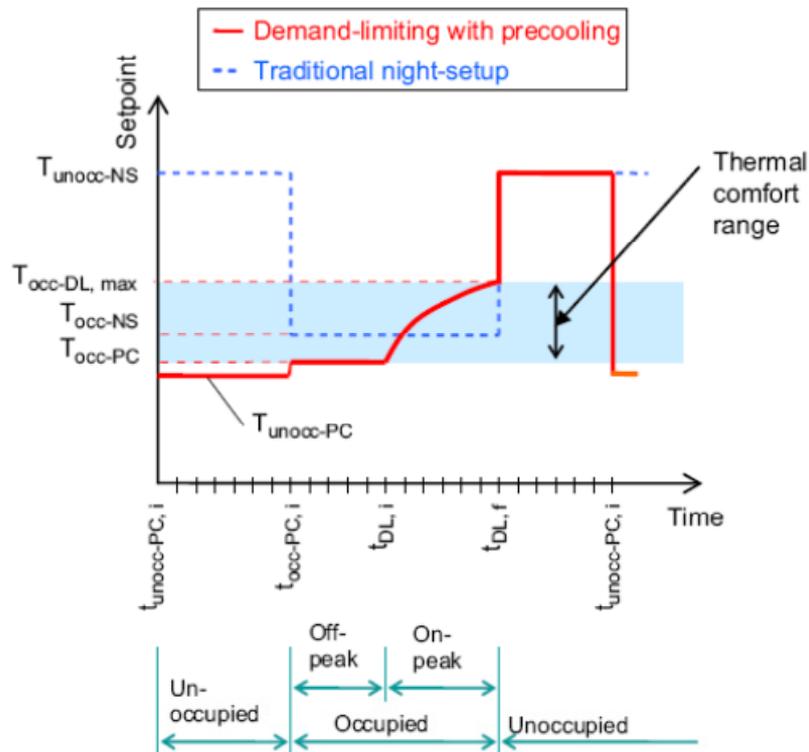
Source : [Braun, 2003]

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.

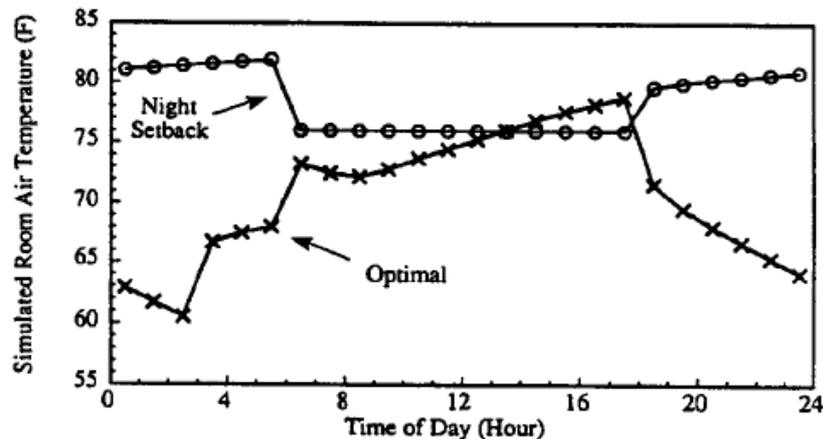
Néanmoins, ces résultats font référence à des bâtiments tertiaires et non des bâtiments résidentiels. Sachant qu'il faut connaître le profil d'occupation, cette stratégie semble difficile à appliquer au secteur résidentiel.

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)

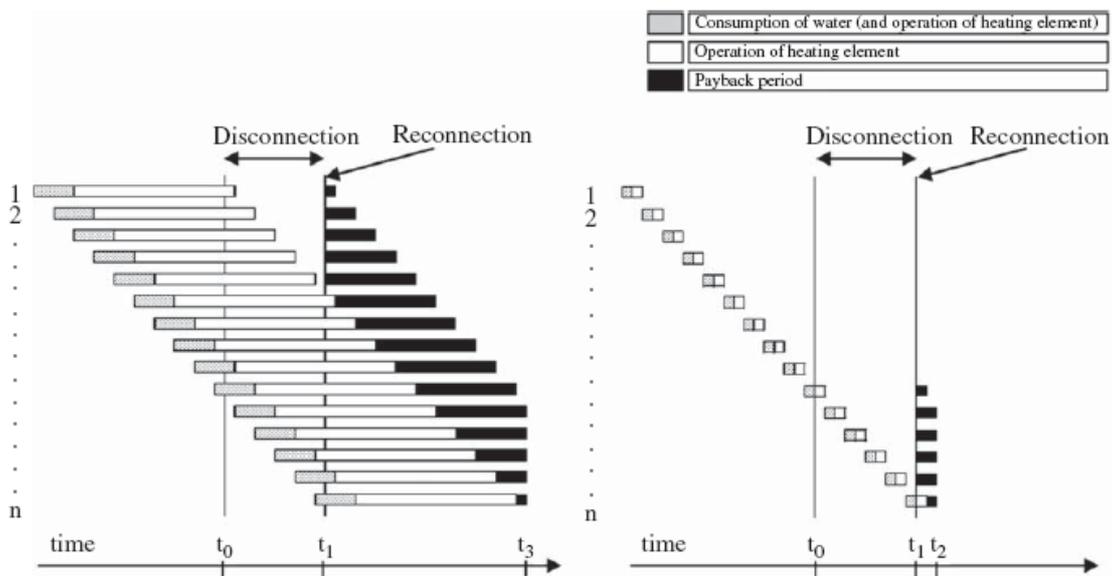
Les systèmes d'ECS électriques les plus répandus sont les ballons d'eau chaude. Leur capacité à stocker l'énergie permet un contrôle plus facile. Pour les systèmes d'ECS instantanés électriques, le décalage de leur mise en route reste pratiquement impossible car comme le nom indique, ces systèmes consomment 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 » (recouvrement<sup>8</sup>) 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.

8 – Voir page125

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.

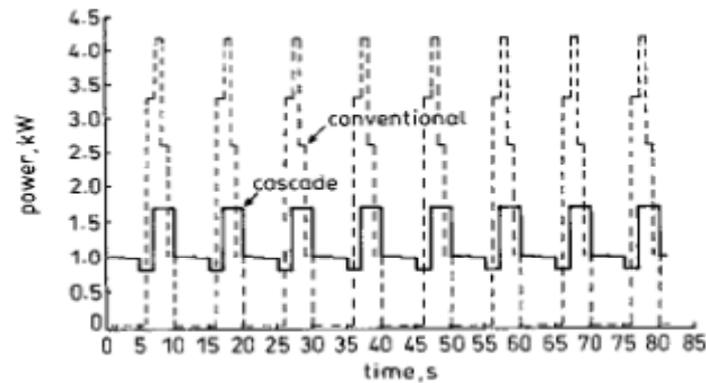
Les économies monétaires sont estimées en appliquant des contrôles simples sur la consigne. Cependant, les économies monétaires par équipement restent très faibles (quelques centimes de \$ (*dollar*) par jour).

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 cascade<sup>9</sup>, 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

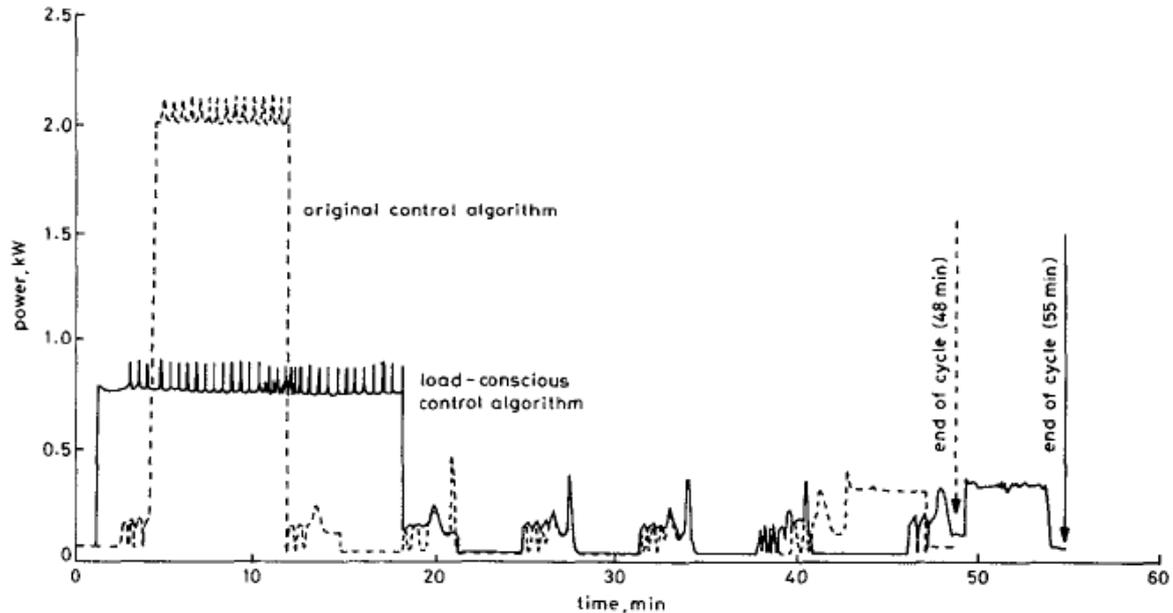
Comme on l'a vu les machines à laver sont normalement utilisées aux heures les plus critiques pour le réseau. Dans ce sens et en imaginant un possible décalage ou un contrôle intelligent, on fait ci-dessous une analyse des études existantes.

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).

<sup>9</sup> 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)

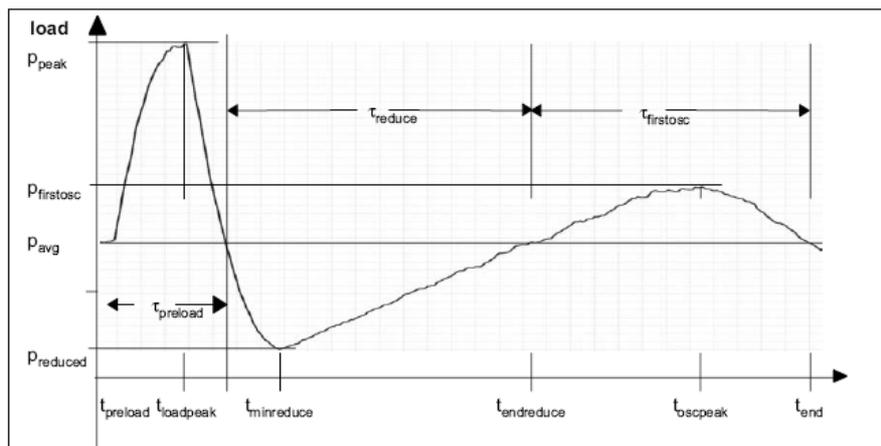
$\tau$  – pas de temps

$T^0$  – température initial (K)

$\eta$  – 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 «  $\tau_{reduce}$  ». 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

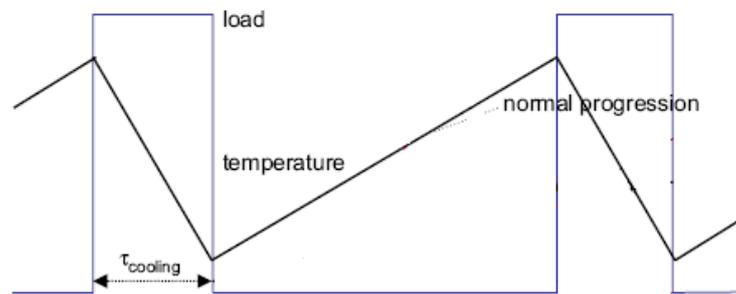
Exemple : Pour un intervalle de 20 minutes entre les signaux de stockage et déstockage, on peut réduire la puissance moyenne appelée de 50 % pendant 59 minutes.

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

<b>Légende :</b>
+++ 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/congérateurs 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.