

# **Evaluation de la flexibilité du chauffage électrique**

## Table de matières – Chapitre IV

<b>4. Evaluation de la flexibilité du chauffage électrique .....</b>	<b>116</b>
<b>4.1. Application de la méthode ILCA à un convecteur électrique .....</b>	<b>117</b>
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
<b>4.2. Caractéristiques des bâtiments simulés .....</b>	<b>121</b>
<b>4.3. Etude de l'impact des différentes stratégies de contrôle .....</b>	<b>124</b>
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
<b>4.4. Sélection d'une stratégie de contrôle .....</b>	<b>162</b>
4.4.1. Analyse énergétique.....	163
4.4.2. Impact énergétique vs inconfort.....	164
<b>4.5. Analyse des gains monétaires pour le consommateur .....</b>	<b>165</b>
<b>4.6. Conclusion – Evaluation de la flexibilité du chauffage électrique .....</b>	<b>171</b>

## 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* »<sup>17</sup>) 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).

---

<sup>17</sup> *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
<b>Off</b> - L'appareil est éteint (mais il peut toujours consommer de l'énergie)
<b>ON</b> - Le convecteur chauffe l'air (fonction principale)

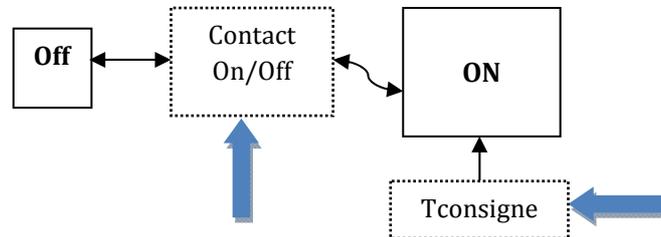


Figure 4-1 - Représentation graphique d'un convecteur électrique - niveau utilisateur

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
<b>Off</b> - l'appareil est éteint (mais il peut consommer énergie)
<b>ON</b> - La résistance est allumée. Dans les appareils avec thermostats PI ou PID la puissance de la résistance est modulée.
<b>Active Standby</b> - Pendant le contrôle par le thermostat.

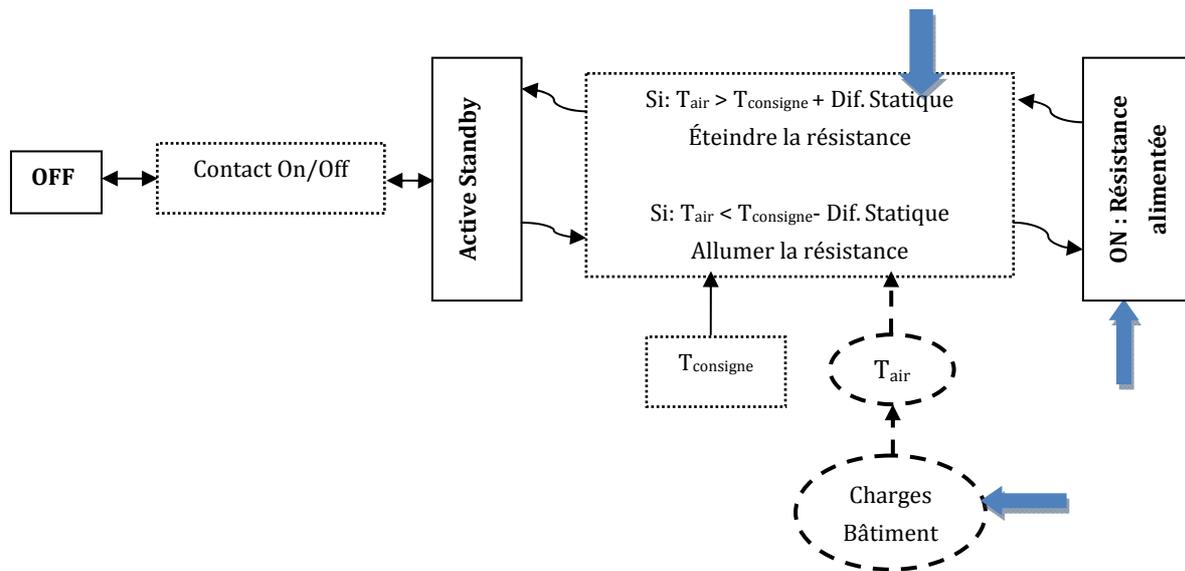


Figure 4-2 - Représentation graphique d'un convecteur électrique - niveau Constructeur

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.

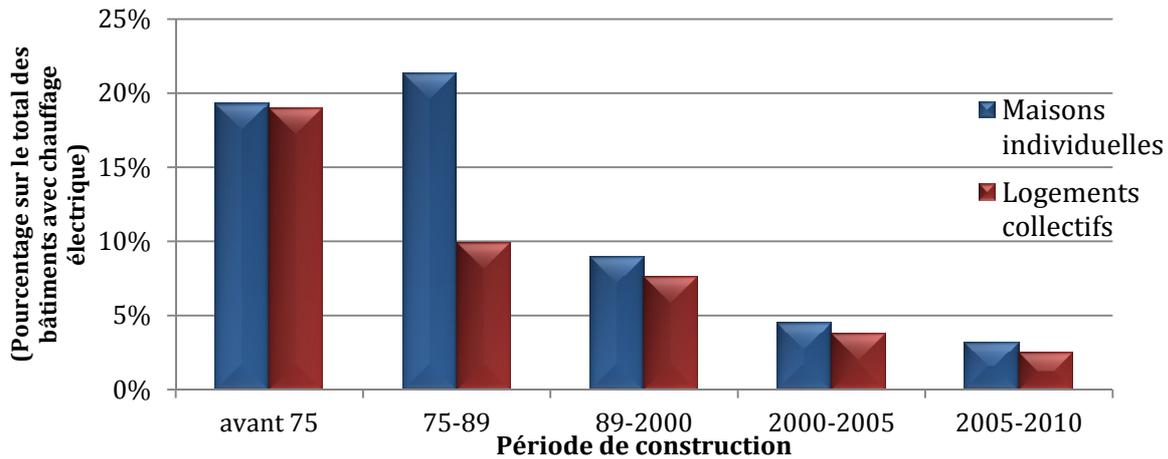


Figure 4-3 – Pourcentage de bâtiments avec chauffage électrique par période de construction

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/m<sup>2</sup>.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

<b>Béton</b>	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 <sup>3</sup> )	2300
<b>Isolant</b>	Conductivité (kJ/h.m.K)	0.11
	Chaleur spécifique (J/kg.K)	840
	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	35
<b>Parois intérieures (Ciment)</b>	Epaisseur murs verticaux [m]	0.05
	Conductivité (kJ/h.m.K)	2.088
	Chaleur spécifique (J/kg.K)	1008
	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	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.

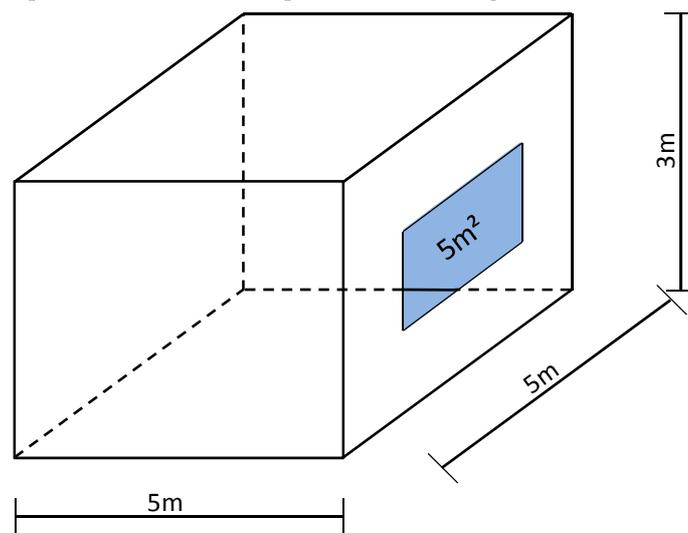


Figure 4-4 – Dimensions de la pièce simulée

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 <sup>2</sup> .K]	3.84
Coef. d'échange global extérieur " $h_{ext}$ " [W/m <sup>2</sup> .K]	25
Coefficient d'absorption " $\alpha$ "	0.6

La valeur nominale des gains internes est fixée à 11.5 W/m<sup>2</sup>. 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.

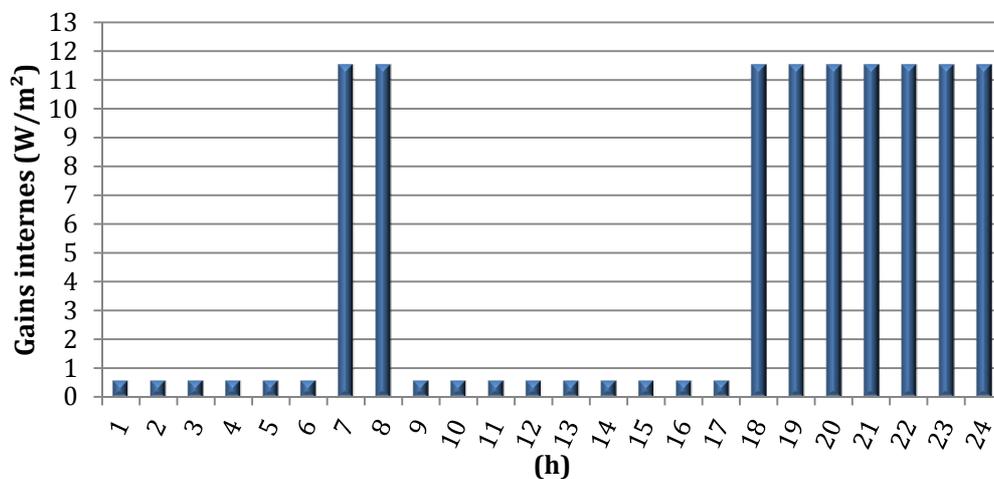


Figure 4-5 – Profil des gains internes (personnes et équipements)

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.

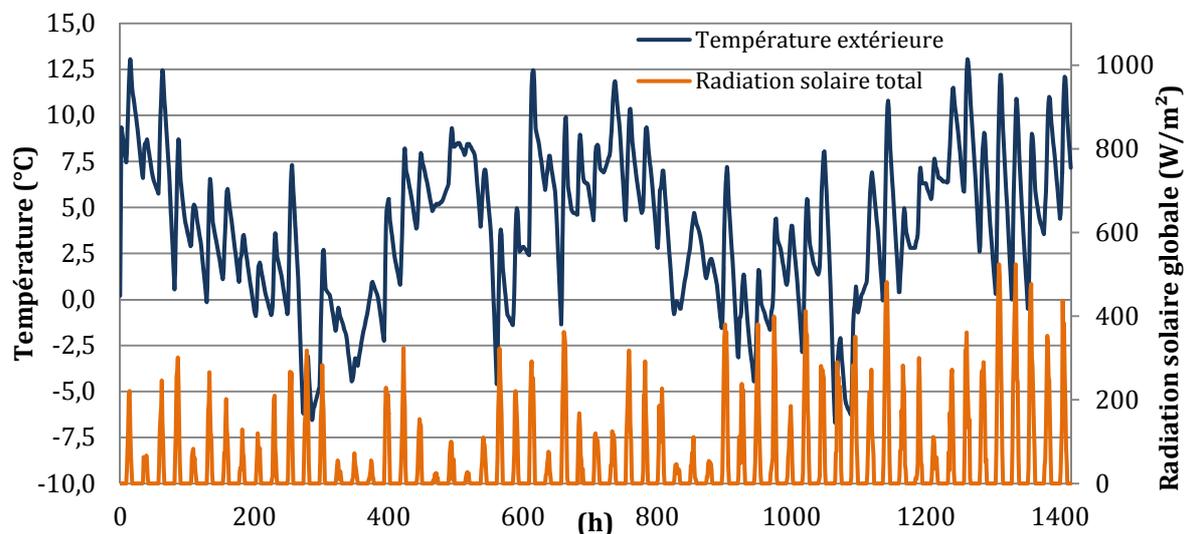


Figure 4-6 - données météorologiques pour les mois de janvier et février - Ville de Trappes

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<sup>er</sup> 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.

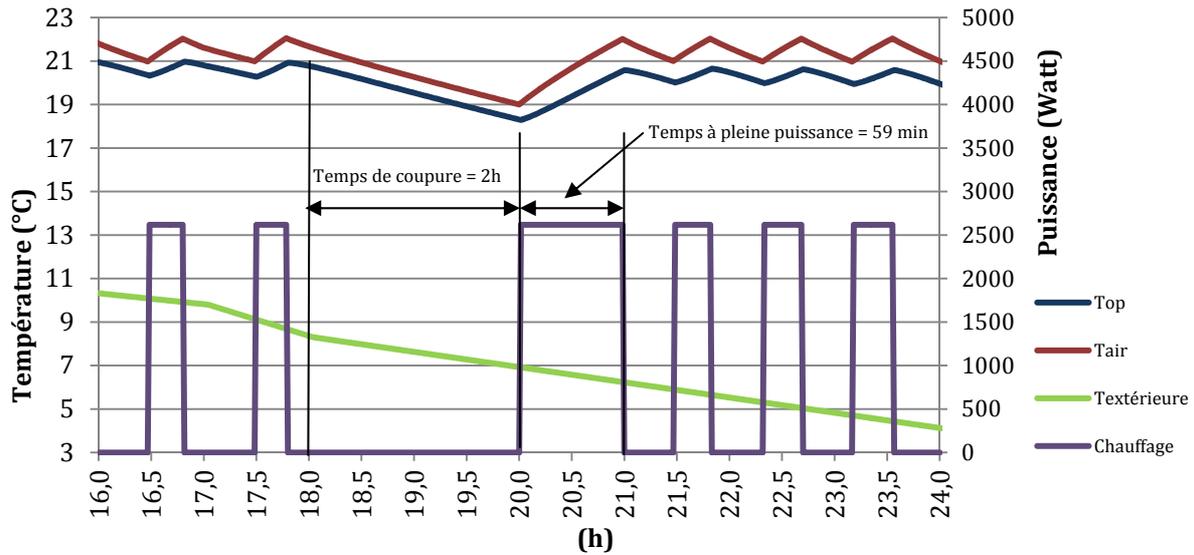


Figure 4-7 – Représentation des évolutions de température et des appels de puissance

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.

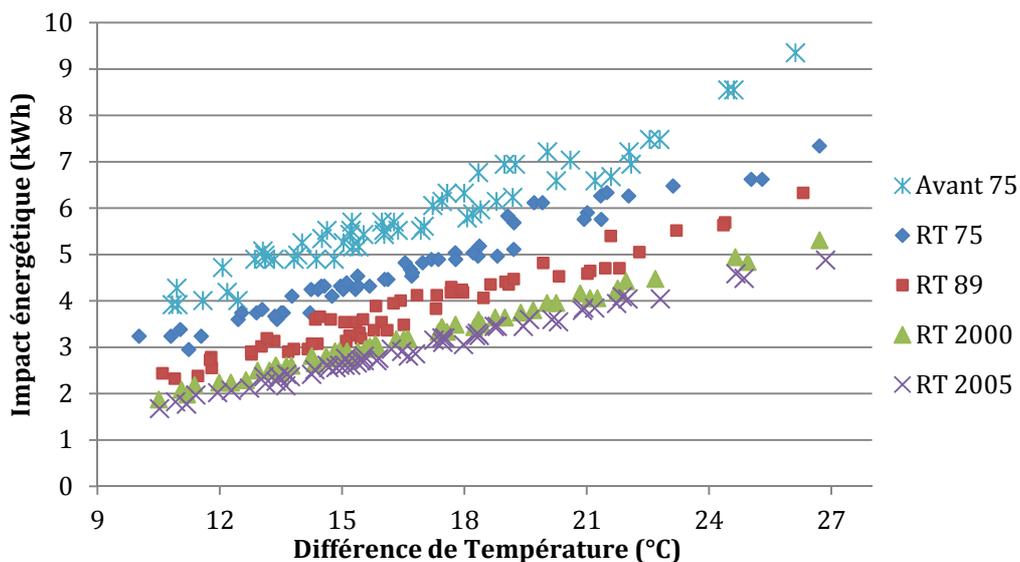


Figure 4-8 – Impact énergétique – Maison individuelle

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.

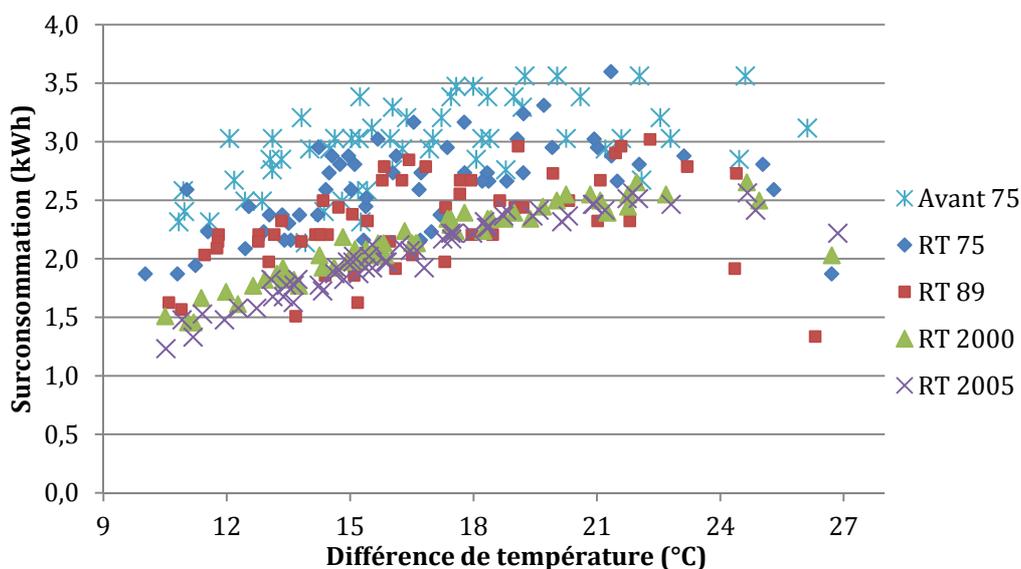


Figure 4-9 – Surconsommation – Maison individuelle

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).

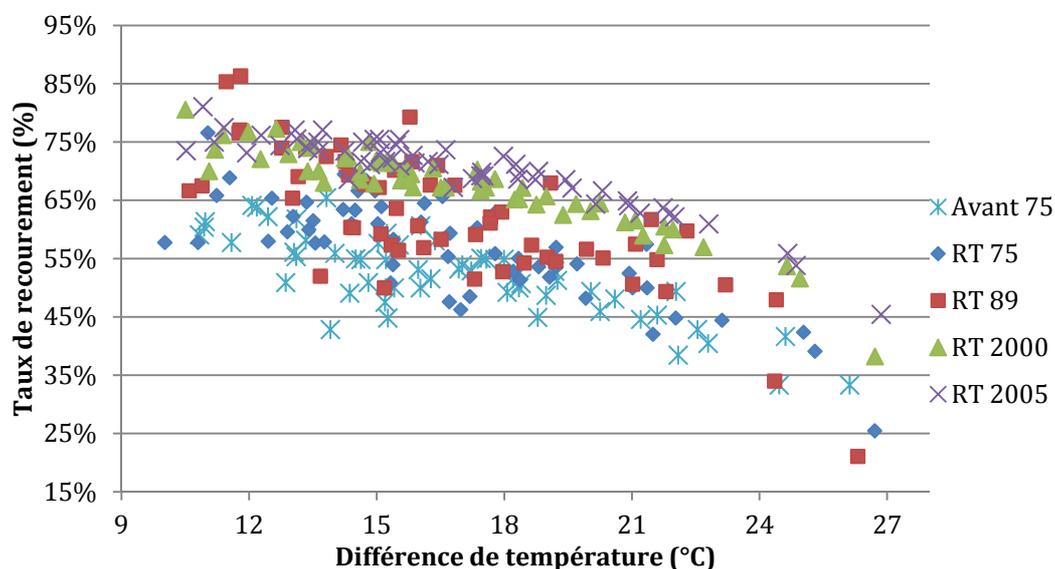


Figure 4-10 – Effet de recouvrement – Maison individuelle

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.

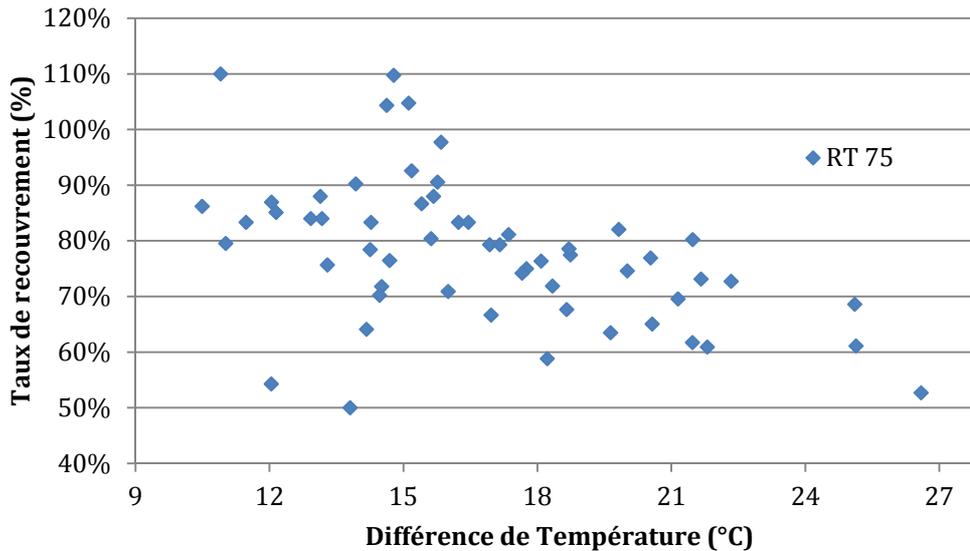


Figure 4-11 – Effet de recouvrement - Appartement

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.

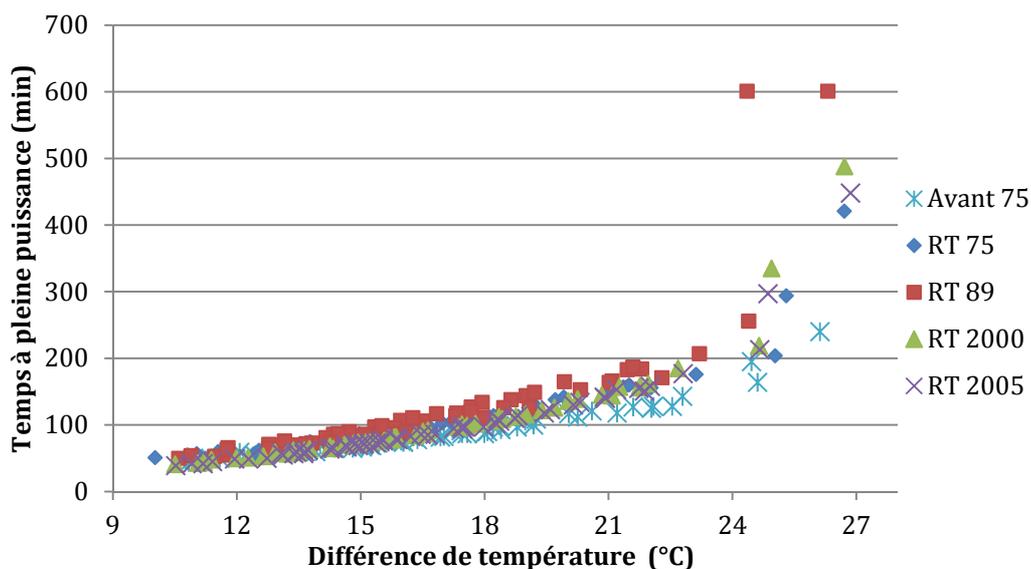


Figure 4-12 – Evolution du temps à pleine puissance – maison individuelle

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.

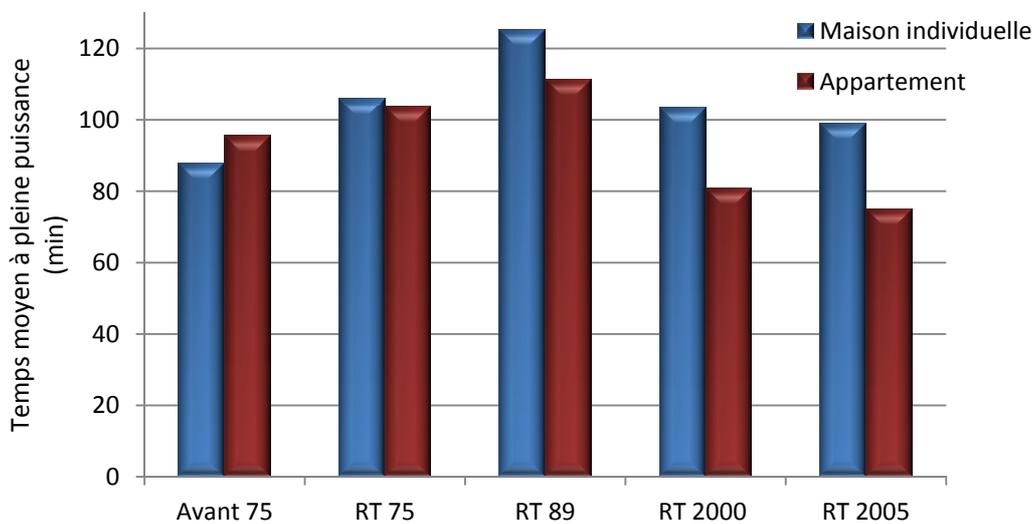


Figure 4-13 – Valeurs moyennes du temps de fonctionnement à pleine puissance après la coupure

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 ».

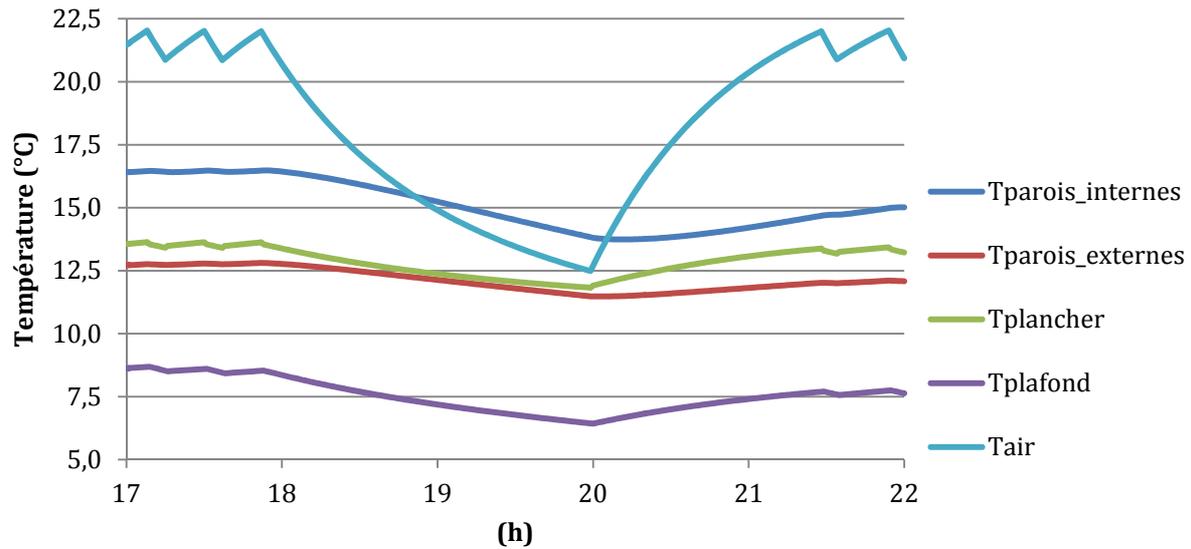


Figure 4-14 – Températures de l'air et des surfaces intérieures des différentes parois lors d'une coupure par un jour très froid – Maison individuelle « Avant 75 »

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.

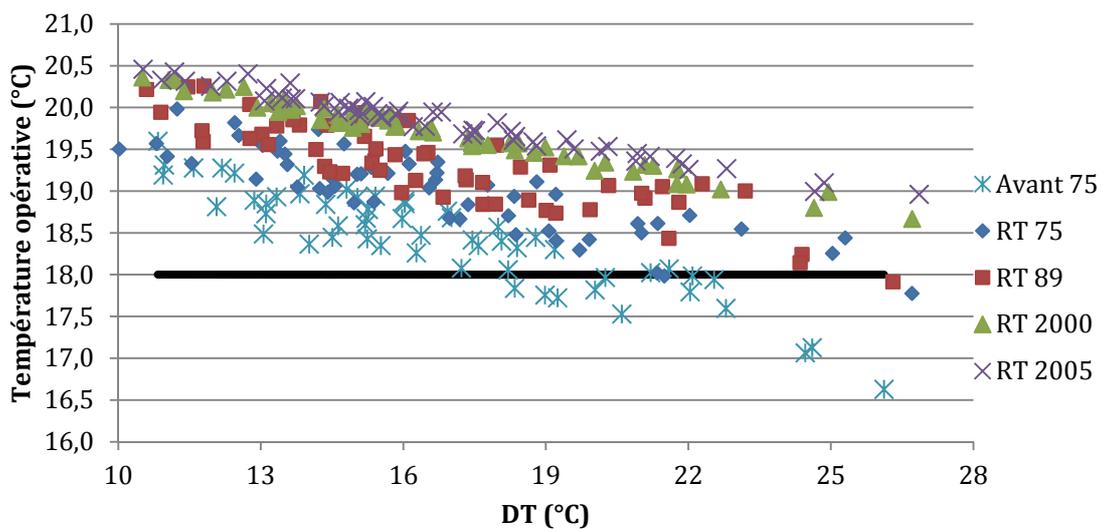


Figure 4-15 – Températures opératives lors de la coupure – maison individuelle

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).

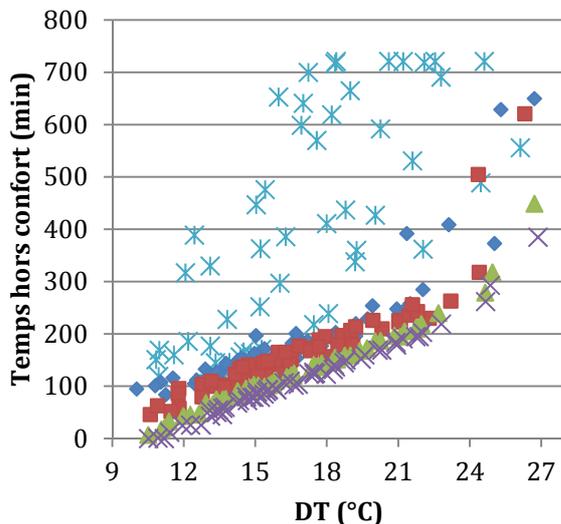


Figure 4-16 - Temps hors confort - Maison Individuelle

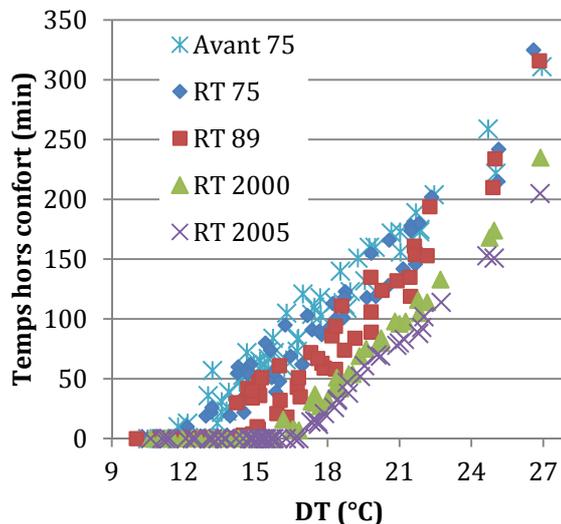


Figure 4-17- Temps hors confort - Appartement

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
<b>Maison individuelle</b>	<i>Temps hors confort [min]</i>	374	193	165	127	111
	<i>DH</i>	10,24	6,90	5,15	3,18	2,47
<b>Appartement</b>	<i>Temps hors confort [min]</i>	92	81	62	<b>36</b>	<b>28</b>
	<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>	<b>2,83</b>	<b>2,59</b>	<b>2,27</b>	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.

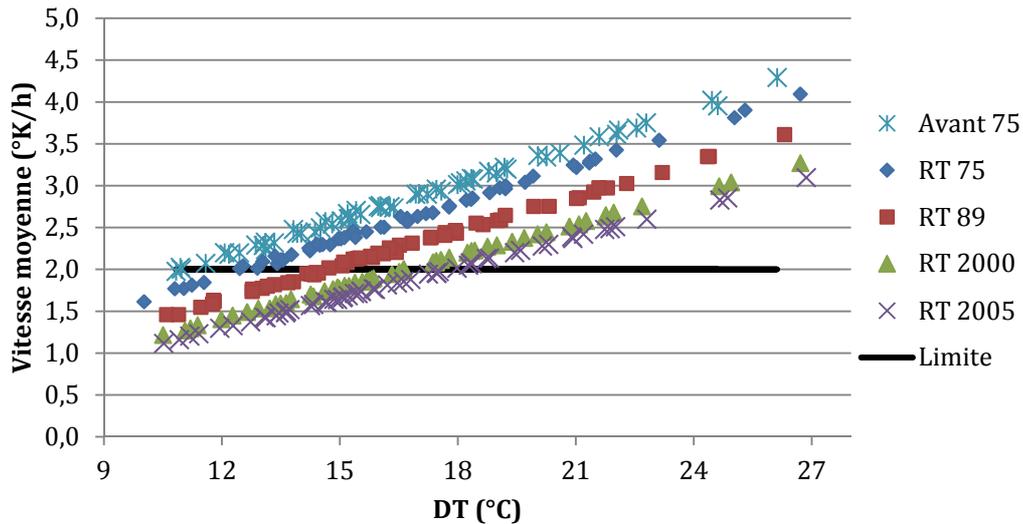


Figure 4-18 – Vitesse moyenne en fonction de « DT » - Maison Individuelle

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.

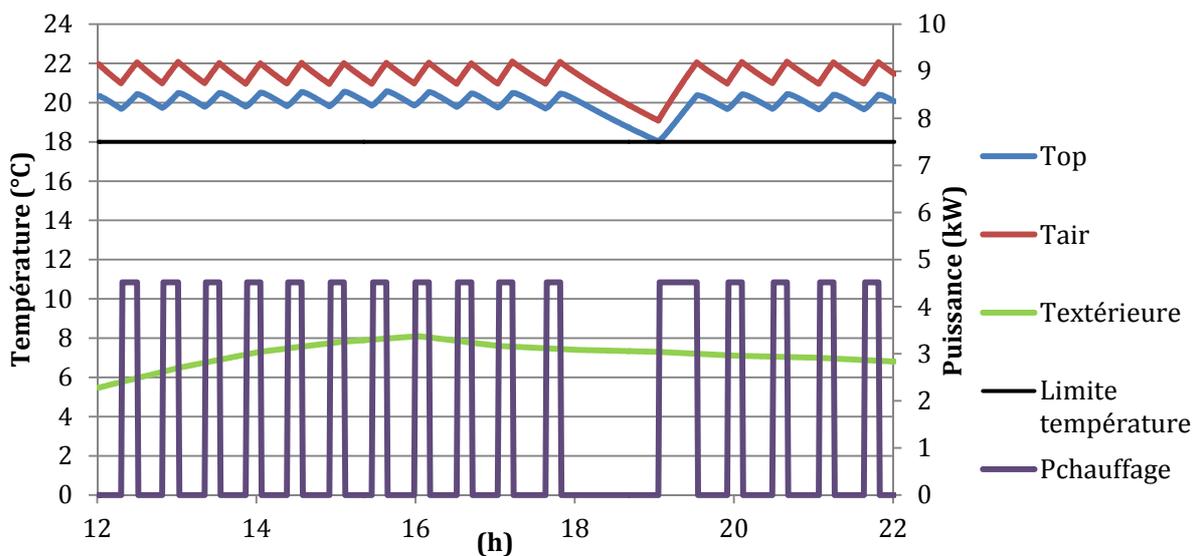


Figure 4-19 – Exemple d'application d'une coupure sans inconfort

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).

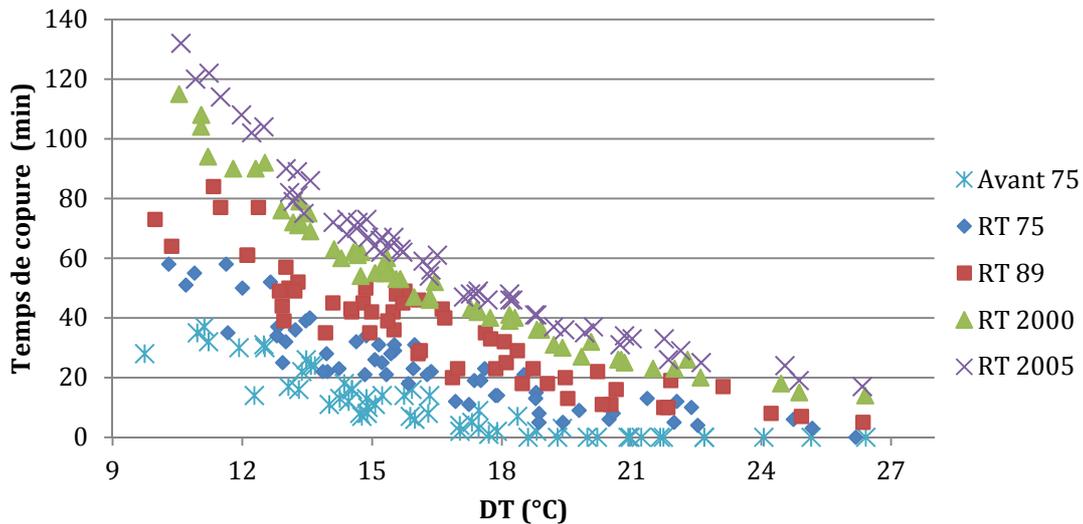


Figure 4-20 – Temps de coupure sans inconfort – Maison Individuelle

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.

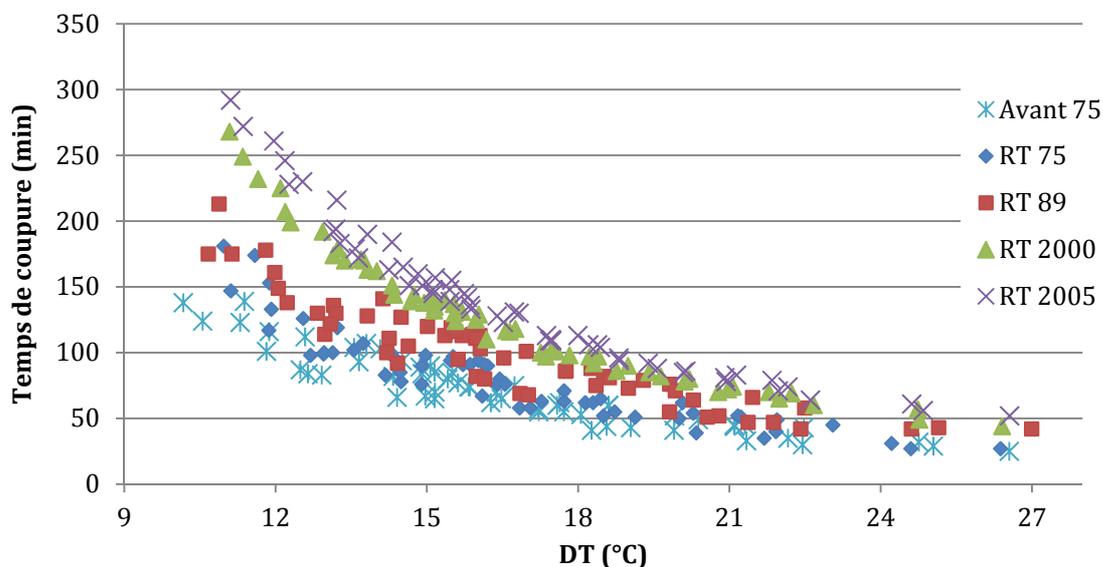


Figure 4-21 - Temps de coupure sans inconfort – Appartement

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.

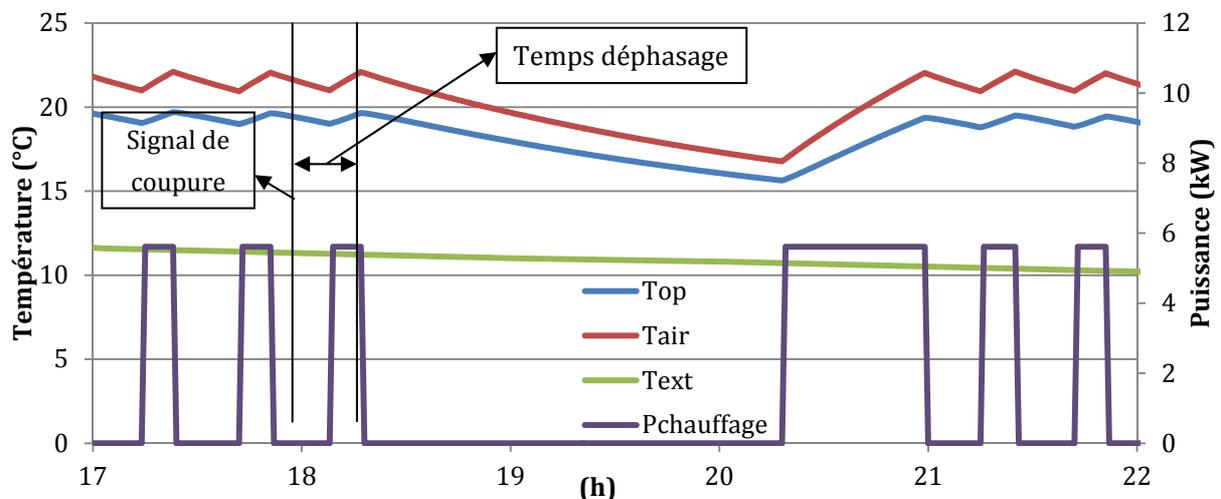


Figure 4-22 – Exemple d'application d'une coupure avec condition de bande morte

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
<b>Maison individuelle</b>	Moyenne (min)	22,1	25,8	25,4	6,6	6,8
<b>Appartement</b>	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
<b>Maison individuelle</b>	Moyenne (min)	2,7	3,6	4,3	6,6	6,8
<b>Appartement</b>	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
<b>Maison Individuelle - <math>C_{air} \times 1</math></b>	0,6	0,8	0,9	1,1	0,8
<b>Appartement - <math>C_{air} \times 1</math></b>	1,2	1,2	1,2	1,0	0,9
<b>Maison Individuelle - <math>C_{air} \times 40</math></b>	24,0	27,7	42,6	9,3	10,6
<b>Appartement - <math>C_{air} \times 40</math></b>	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 ( $C_{air} \times 20$ ).

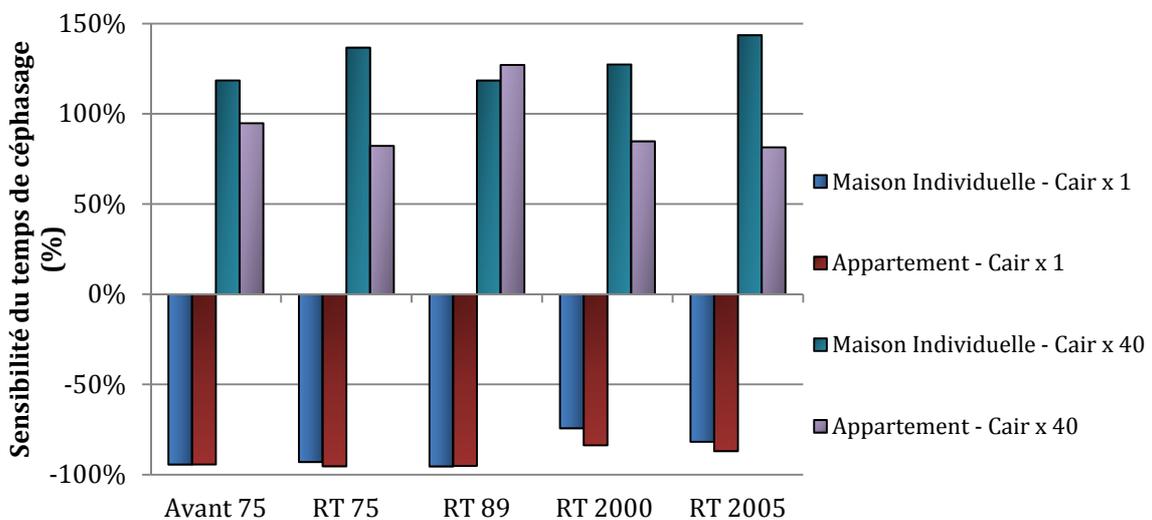


Figure 4-23 – Sensibilité du temps de déphasage à l'inertie du nœud d'air

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
<b>Maison individuelle</b>	<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%
<b>Appartement</b>	<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
<b>Maison individuelle</b>	<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%
<b>Appartement</b>	<i>Temps hors confort</i>	<b>-12,5%</b>	<b>-14,5%</b>	<b>-19,6%</b>	-4,2%	-7,5%
	<i>DH</i>	<b>-18,4%</b>	<b>-19,3%</b>	<b>-22,7%</b>	-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.

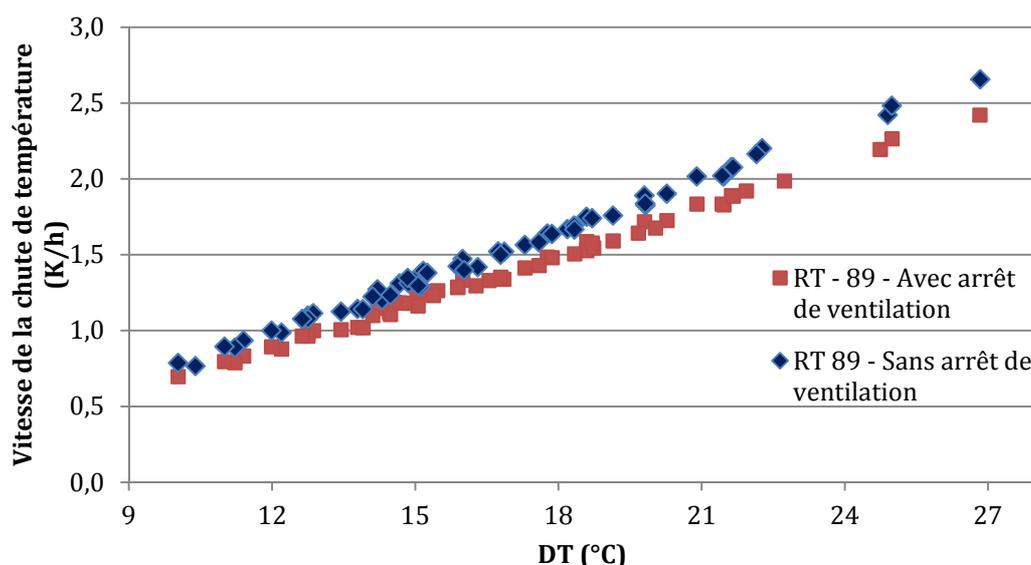


Figure 4-24 – Vitesse de la chute de température pour une coupure avec et sans arrêt de la ventilation

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
<b>Maison individuelle</b>	Temps hors confort	0,4%	2,5%	4,2%	7,8%	9,8%
	DH	3,7%	7,0%	9,9%	15,2%	17,5%
<b>Appartement</b>	Temps hors confort	<b>10,1%</b>	<b>15,3%</b>	<b>21,4%</b>	<b>28,4%</b>	<b>33,5%</b>
	DH	<b>17,0%</b>	<b>24,0%</b>	<b>29,6%</b>	<b>38,7%</b>	<b>43,8%</b>

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
Maison Individuelle	373	188	158	117	100
Appartement	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
<b>Maison Individuelle</b>	Modification de la Surconsommation	-3%	-4%	-3%	-6%	-6%
	Modification du Recouvrement	-3%	-4%	-3%	-7%	-7%
<b>Appartement</b>	Modification de la Surconsommation	-7%	-9%	-12%	-12%	-13%
	Modification du Recouvrement	-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.

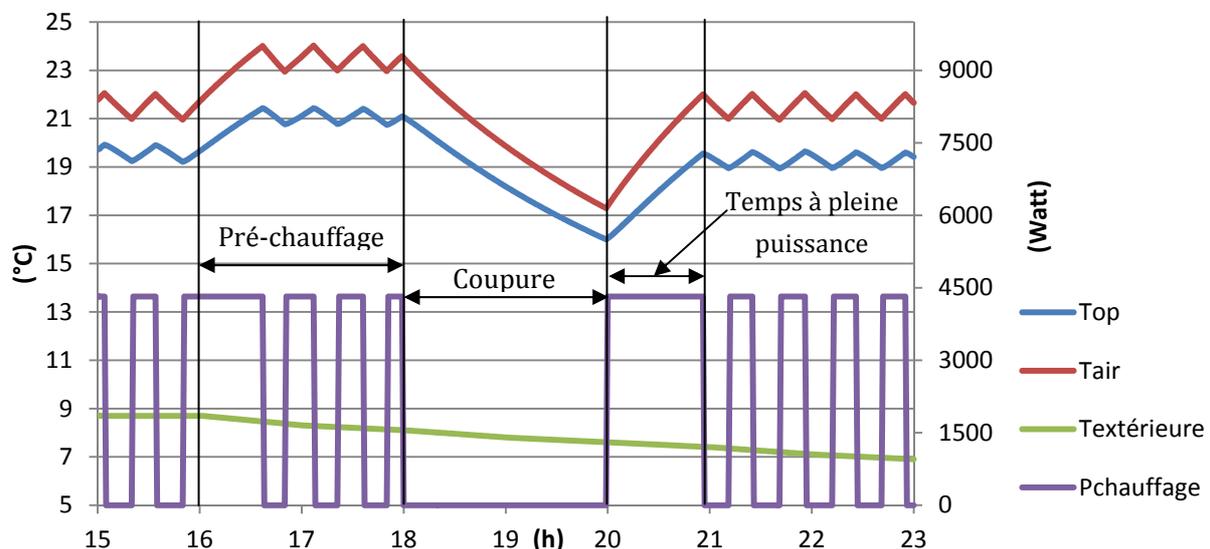


Figure 4-25 - Exemple d'application d'une coupure avec préchauffage – Maison individuelle RT 75

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

		<b>Avant 75</b>	<b>RT 75</b>	<b>RT 89</b>	<b>RT 2000</b>	<b>RT 2005</b>
<b>Maison individuelle</b>	<i>Recouvrement</i>	52%	50%	49%	47%	45%
	<i>Surconsommation</i>	51%	49%	47%	44%	42%
<b>Appartement</b>	<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

<b>Temps moyen hors confort (min)</b>		<b>Avant 75</b>	<b>RT 75</b>	<b>RT 89</b>	<b>RT 2000</b>	<b>RT 2005</b>
<b>Coupure avec préchauffage / Coupure simple</b>	<b>Maison individuelle</b>	349/374	154/193	111/165	70/127	53/110
	<b>Appartement</b>	<b>41/92</b>	<b>31/80</b>	<b>21/62</b>	<b>7/36</b>	<b>4/28</b>

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.

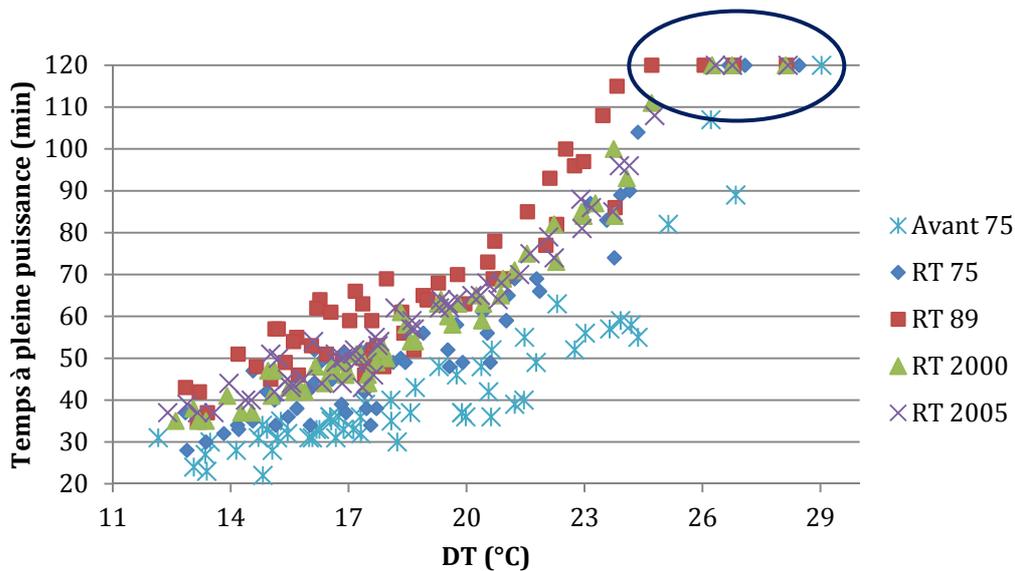


Figure 4-26 – Temps à pleine puissance pendant le préchauffage – Maison individuelle

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.

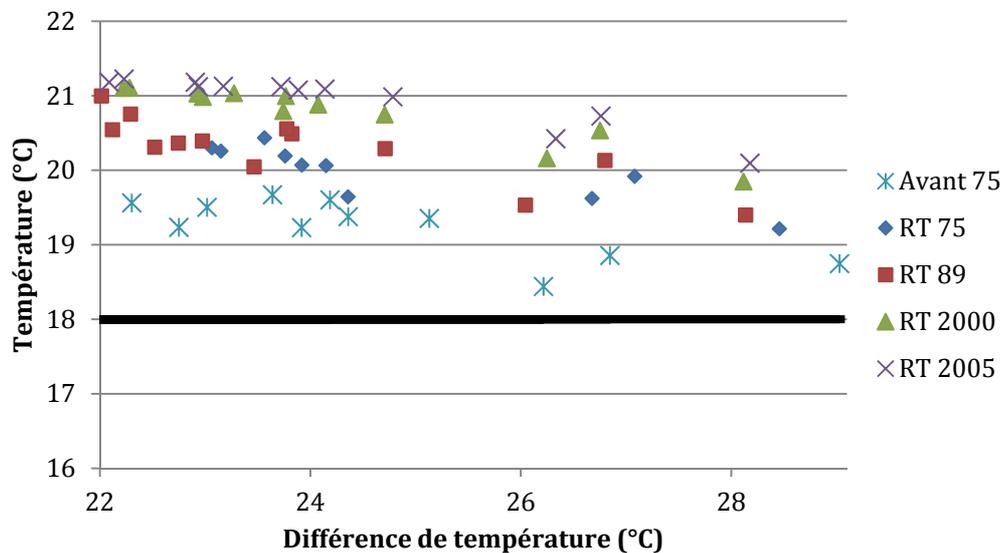


Figure 4-27 – Température opérative avant la coupure avec préchauffage (DT élevées) – Maison individuelle

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.

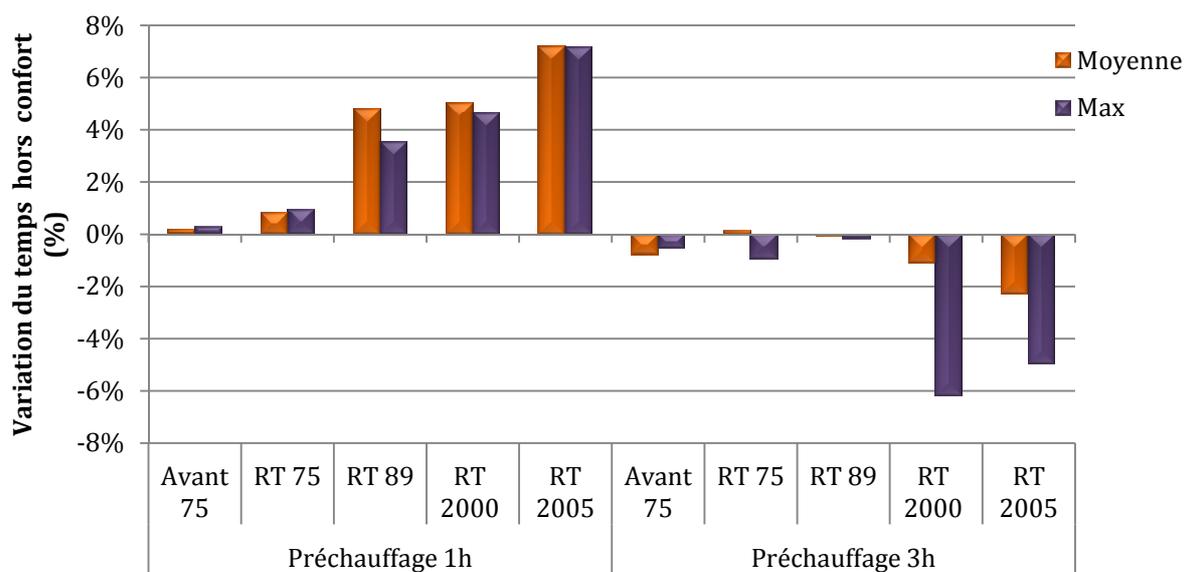


Figure 4-28 – Influence du temps de préchauffage sur le temps hors confort – Maison individuelle

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.

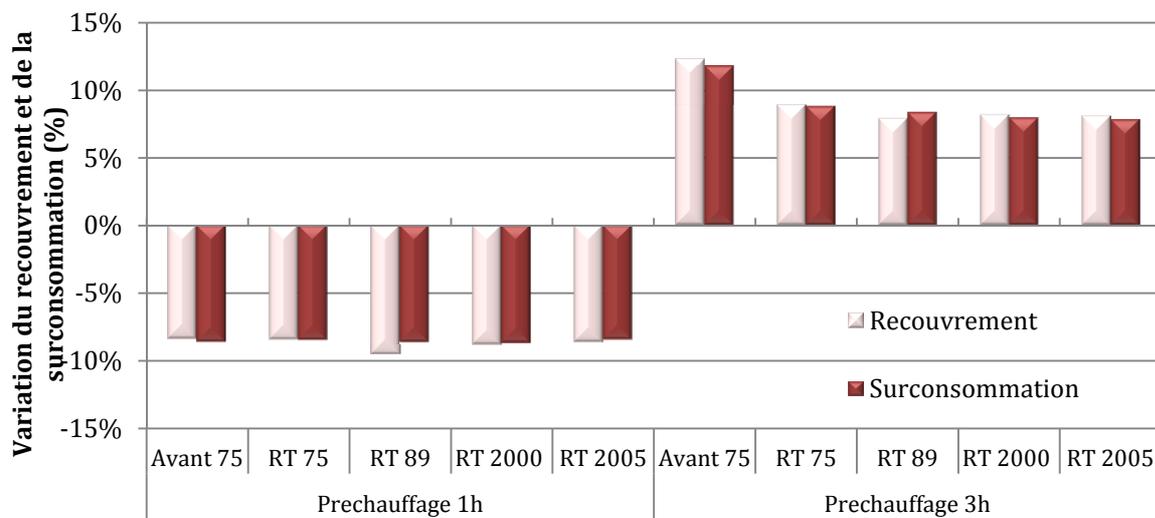


Figure 4-29 – Influence du temps de préchauffage sur le recouvrement et surconsommation – Maison Individuelle

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.

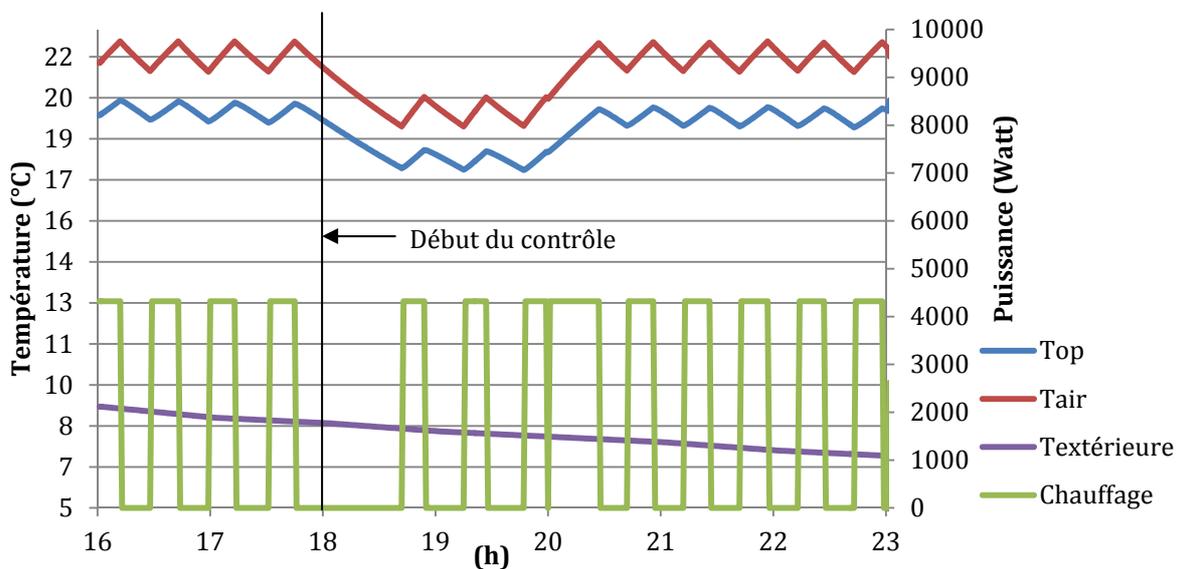


Figure 4-30 - Exemple d'application de passage en mode ECO pendant 2 heures - Maison Individuelle RT 75

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
<b>Maison individuelle</b>	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%
<b>Appartement</b>	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
<b>Maison individuelle</b>	Variation du Temps hors confort	-9%	-32%	-46%	-62%	-67%
	Variation des DH	-64%	-81%	-85%	-91%	-93%
<b>Appartement</b>	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.

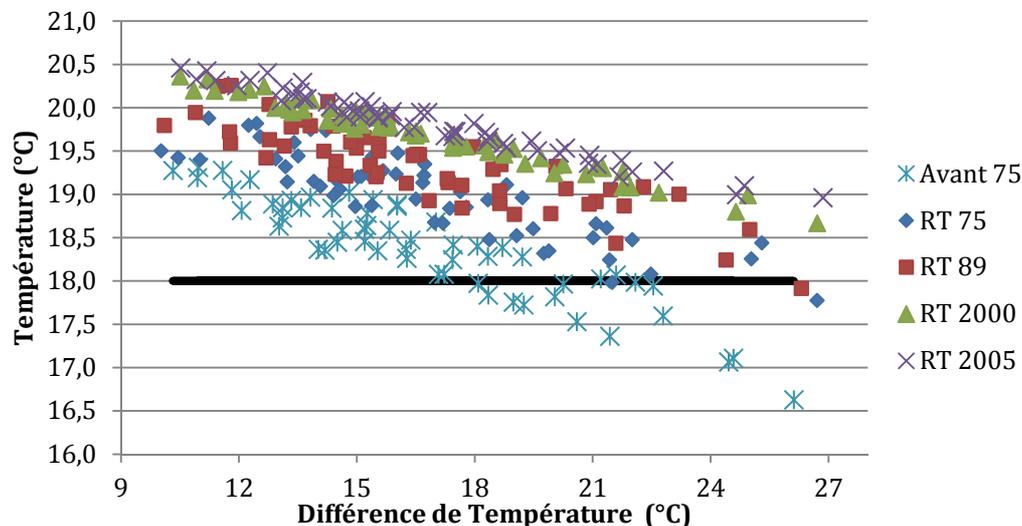


Figure 4-31 – Température opérative dans la pièce lors de l'application du contrôle – Maison Individuelle

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  $2\text{ K/h}$ , 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  $2\text{ K/h}$ . 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

<b><math>h_{int}</math> [W/m<sup>2</sup>.K]</b>	1,5 - 8
<b>Orientation du bâtiment</b>	Sud
<b>Isolation extérieure</b>	-
<b>Capacité du nœud d'air</b>	1 - 40 x C <sub>air</sub>
<b>Epaisseur des parois internes [m]</b>	0,05 - 0,15
<b>Epaisseur parois externes (couche béton) [m]</b>	0,1 - 0,3
<b>Débit de ventilation [Vol/h]</b>	0,3 - 0,9
<b>Puissance du chauffage</b>	80% - 120%
<b>Panneau radiant</b>	-
<b>Gains internes [W/m<sup>2</sup>]</b>	5,75 - 17,25
<b>Surface fenêtre</b>	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.

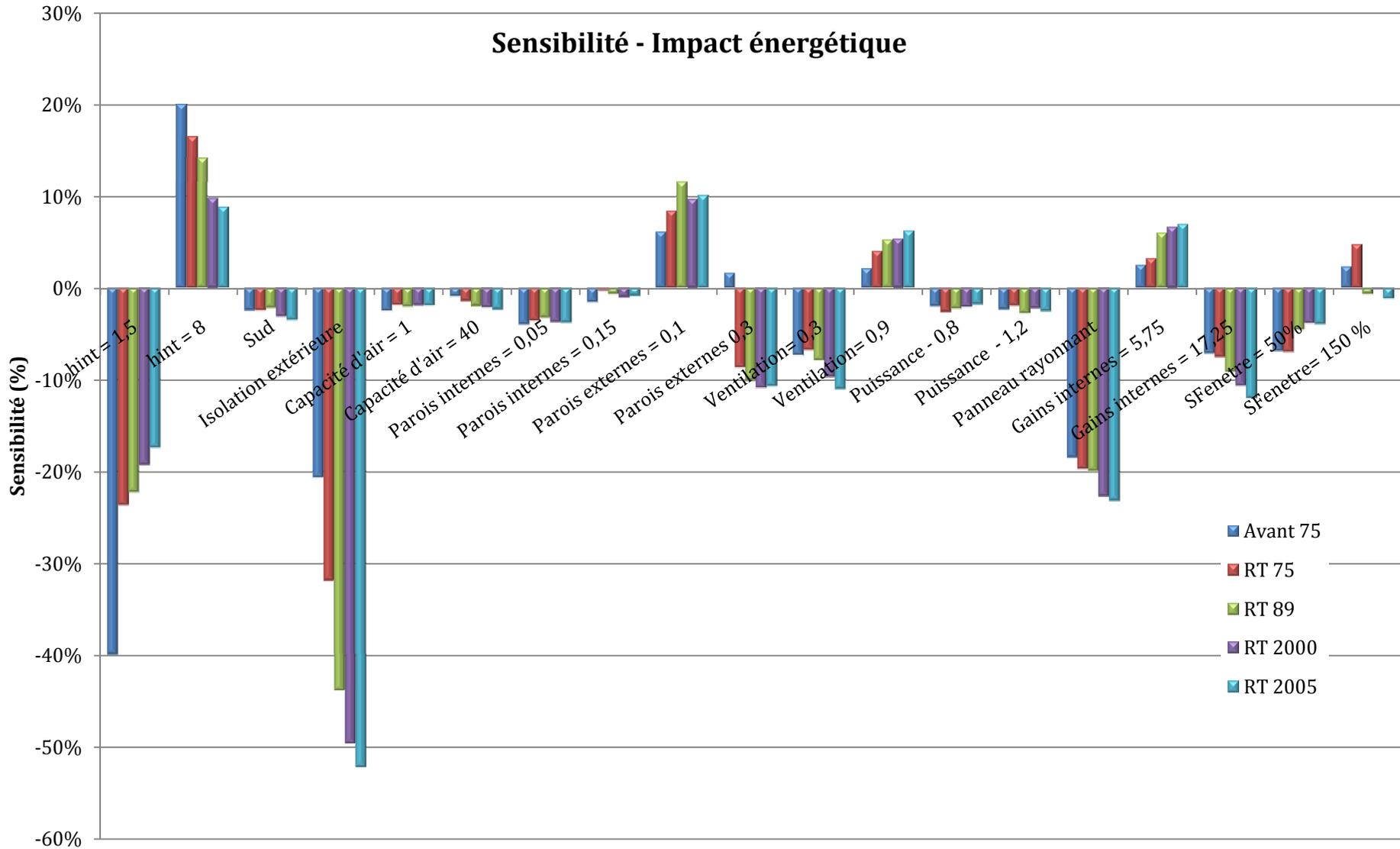


Figure 4-32 – Sensibilité de l'impact énergétique aux différents paramètres

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.

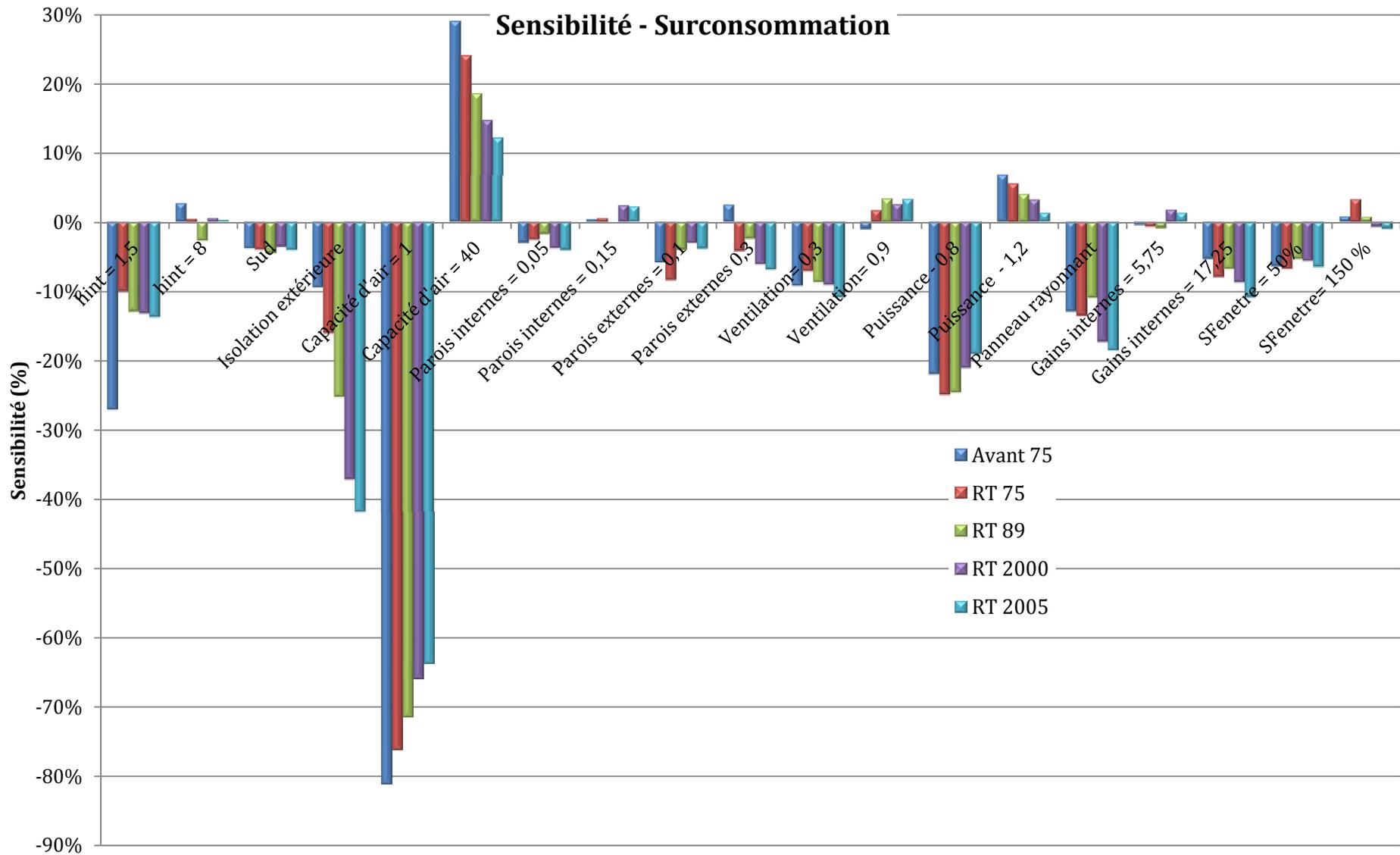


Figure 4-33 – Sensibilité de la surconsommation aux différents paramètres

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  $6 \text{ W/m}^2$  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.

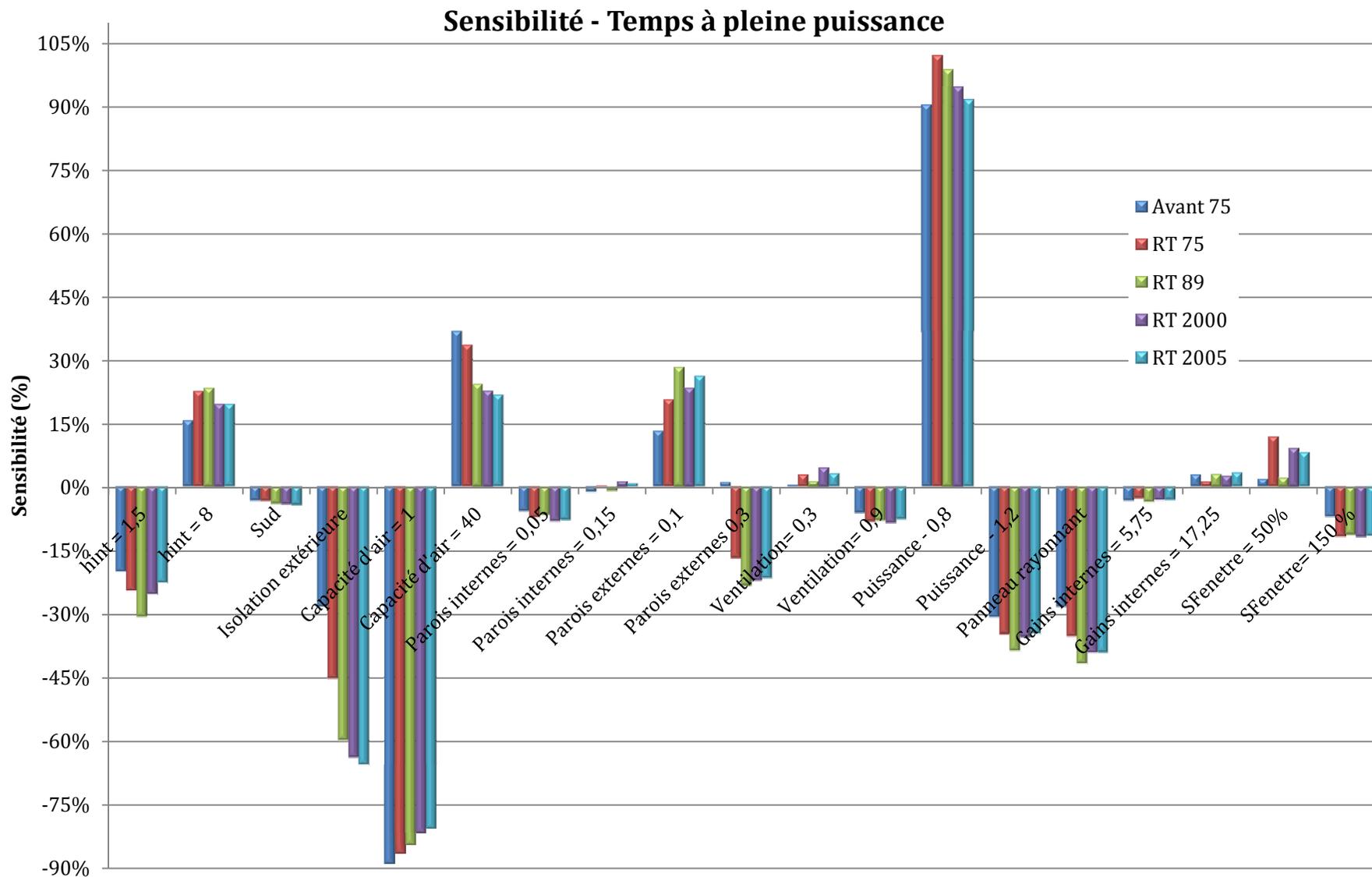


Figure 4-34 – Sensibilité du temps à pleine puissance aux différents paramètres

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.

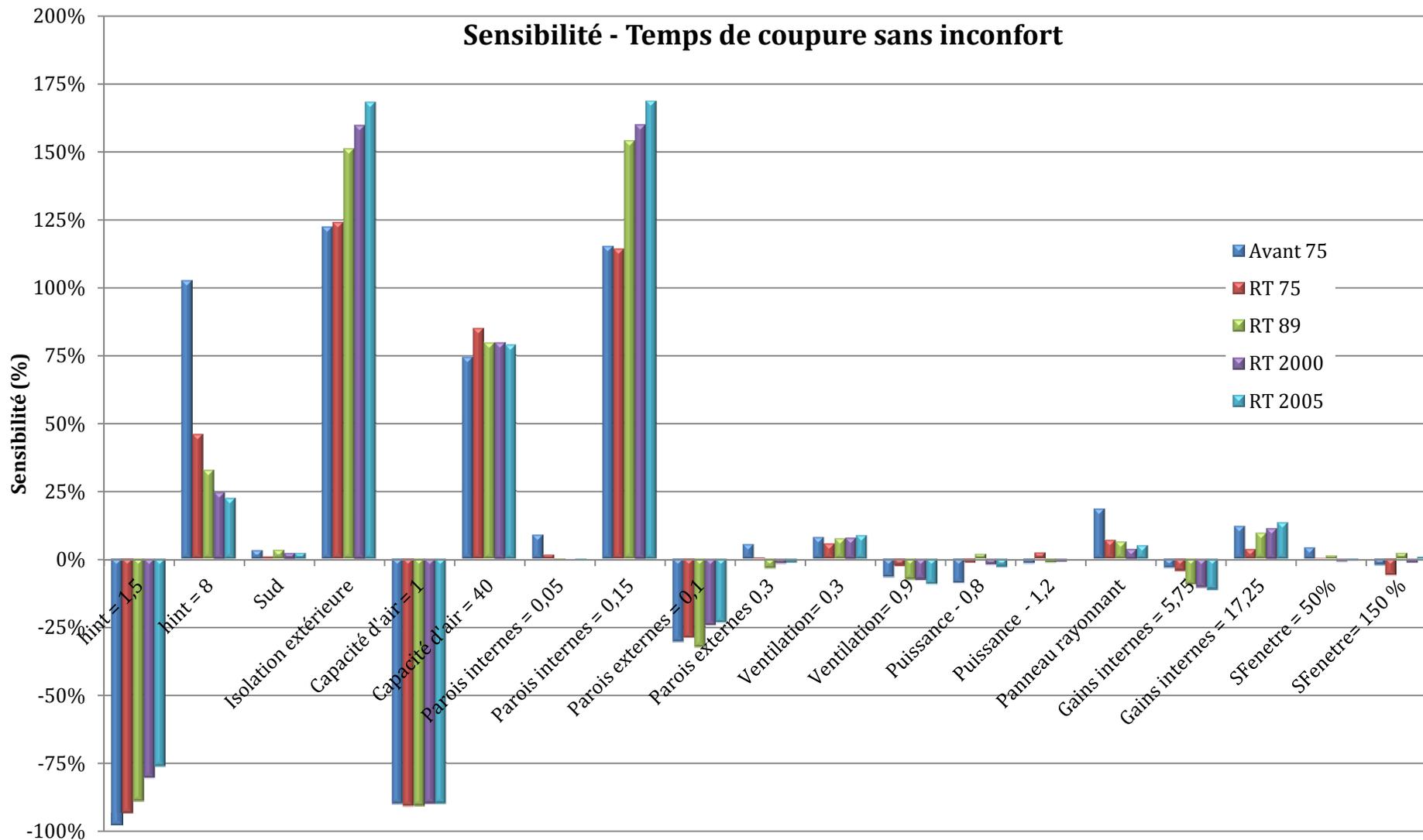


Figure 4-35 - Sensibilité du temps de coupure aux différents paramètres

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.

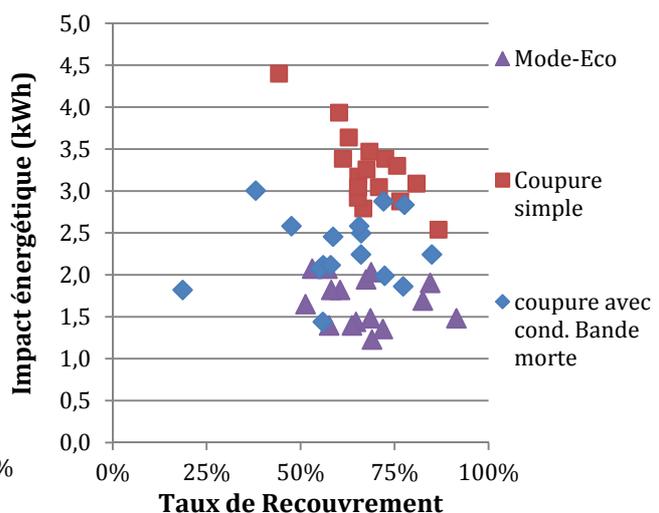
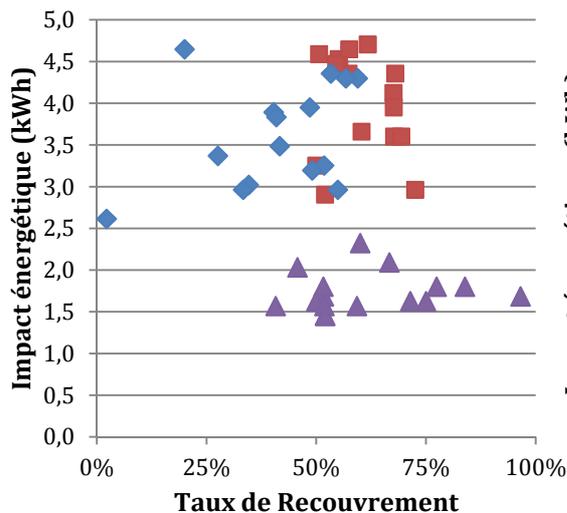


Figure 4-37 – Analyse énergétique - Maison Individuelle

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.

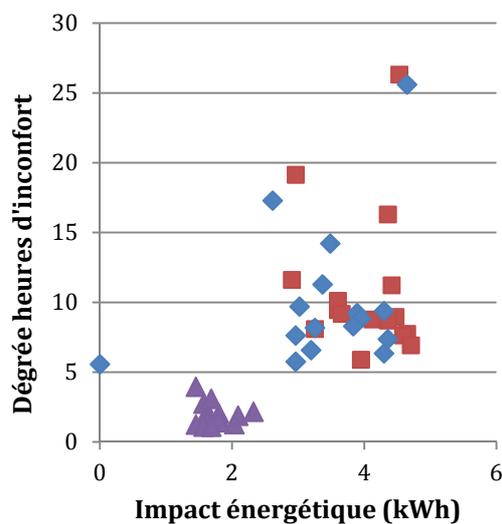


Figure 4-39- Impact énergétique vs inconfort  
– Maison Individuelle

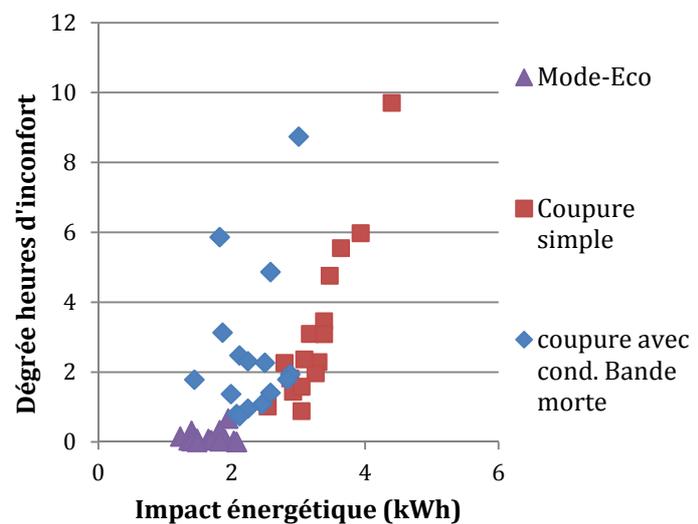


Figure 4-38- Impact énergétique vs inconfort - Appartement

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 <sup>18</sup> » 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 :

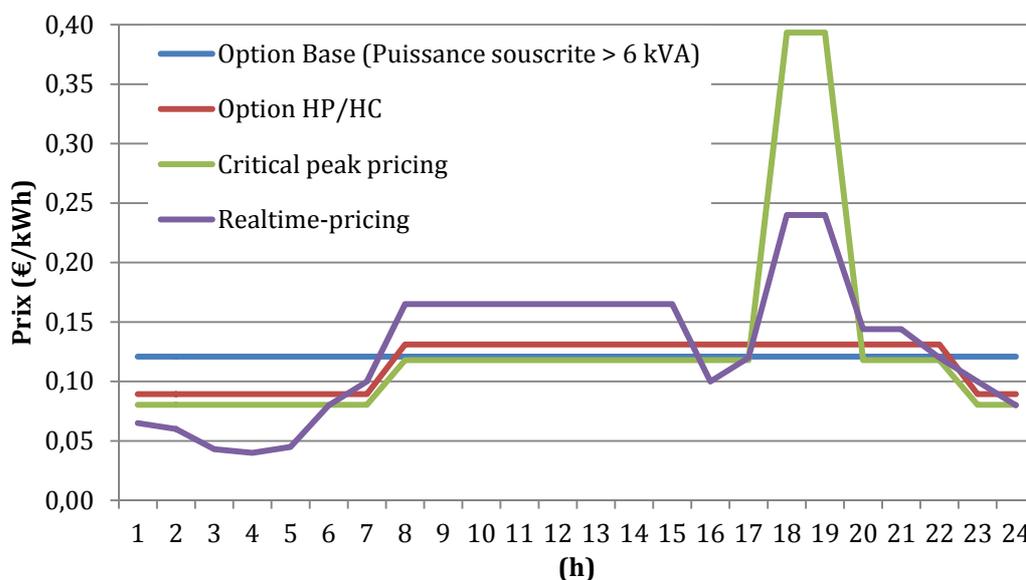


Figure 4-40 – Tarifications analysées

<sup>18</sup> - « 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

	<b>Avant 75</b>	<b>RT 75</b>	<b>RT 89</b>	<b>RT 2000</b>	<b>RT 2005</b>
<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.

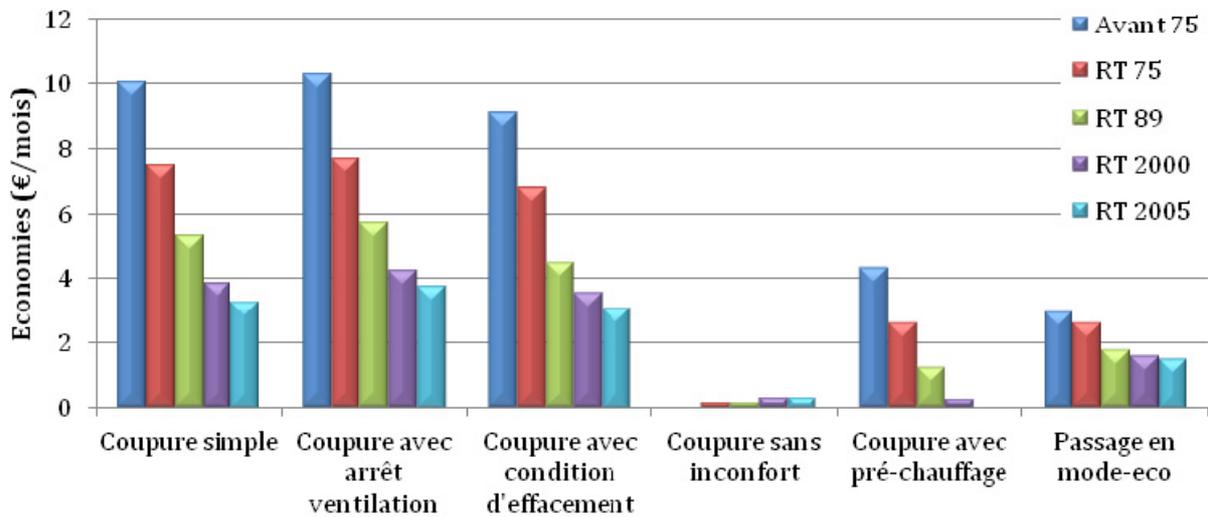


Figure 4-41 – Économies réalisées avec la tarification base – Maison individuelle

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.

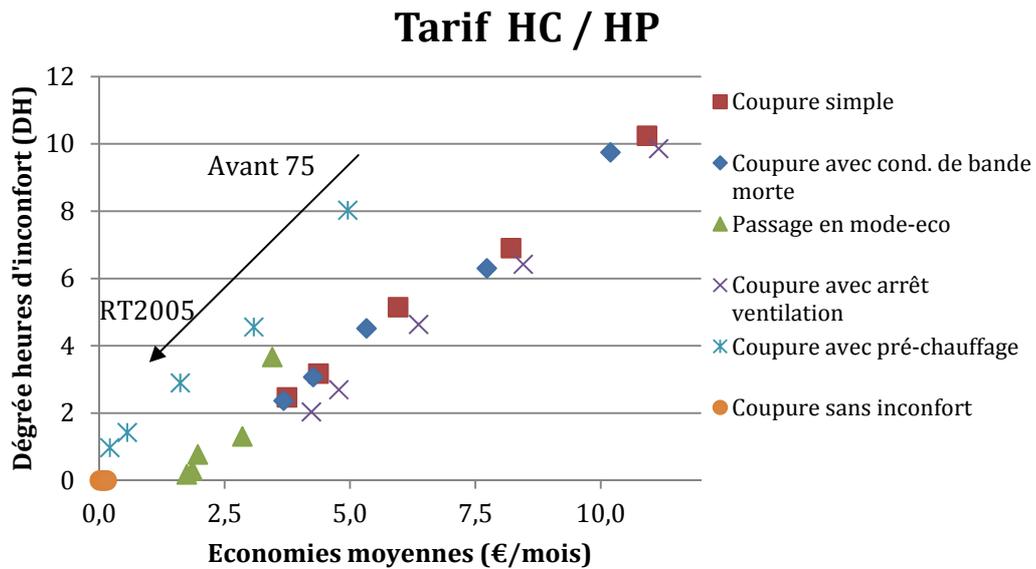


Figure 4-42 – Économies/inconfort réalisés avec la tarification HC/HP- Maison individuelle

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.

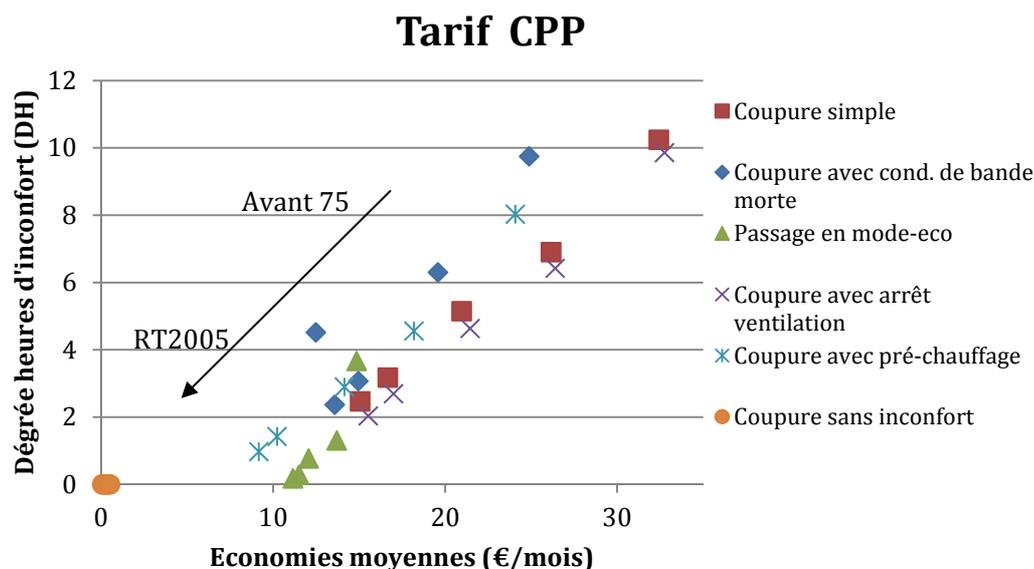


Figure 4-43 – Économies/inconfort réalisés avec la tarification CPP – Maison individuelle

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.

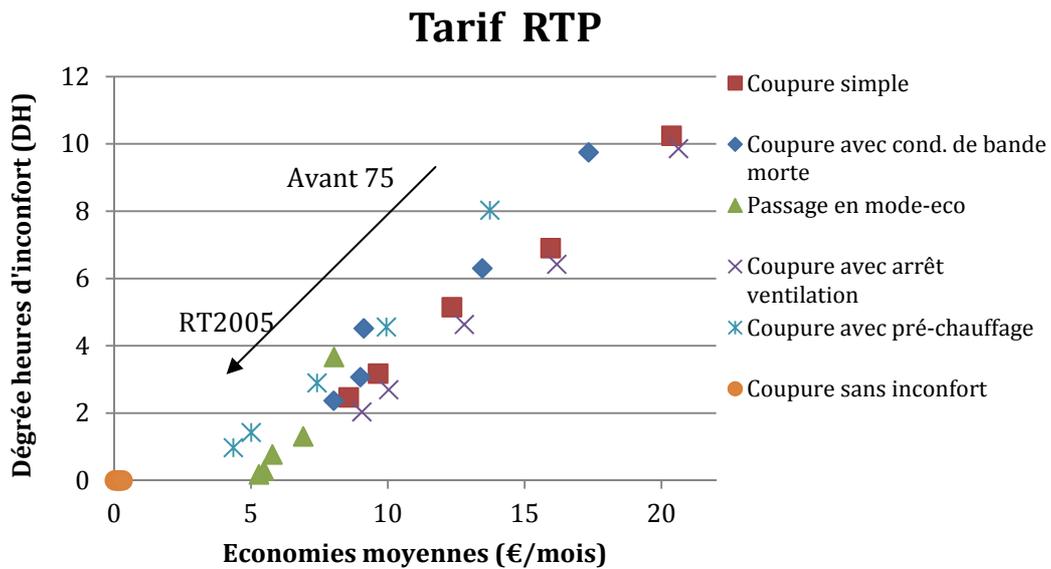


Figure 4-44 - Économies réalisés avec la tarification RTP – Maison individuelle

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.

