

Chapitre 1

La régulation énergétique des bâtiments

L'objectif de ce chapitre consiste à réaliser un état de l'art sur la régulation énergétique des bâtiments. Dans un premier temps, nous chercherons à déterminer les principaux objectifs de la régulation ainsi que les commandes associées. Par la suite, les différents types de modèles utilisés pour la mise en place d'une régulation anticipative seront présentés. Les méthodes de résolution du problème d'optimisation ainsi posé seront également étudiées. Enfin, nous nous concentrerons sur la problématique de gestion du réseau électrique et en particulier sur l'application de la régulation énergétique des bâtiments pour répondre à cet enjeu.

PLAN DU CHAPITRE 1

1.	<u>LES OBJECTIFS DE LA RÉGULATION</u>	<u>23</u>
2.	<u>ÉTAT DE L'ART DES SYSTÈMES DE RÉGULATION</u>	<u>25</u>
2.1	INTRODUCTION	25
2.2	SYSTÈMES DE RÉGULATION SANS MODÈLE THERMIQUE DU BÂTIMENT	26
2.2.1	LES RÉGULATEURS CLASSIQUES	26
2.2.2	LES RÉGULATEURS AVANCÉS.....	26
2.3	SYSTÈME DE RÉGULATION AVEC MODÈLE THERMIQUE DU BÂTIMENT	27
2.3.1	LES MODÈLES THERMIQUES DU BÂTIMENT	27
2.3.2	LA COMMANDE PRÉDICTIVE	30
2.3.3	L'OPTIMISATION HORS-LIGNE	31
3.	<u>THÉORIE DE LA COMMANDE PRÉDICTIVE</u>	<u>32</u>
3.1	LA COMMANDE OPTIMALE.....	32
3.1.1	LE PRINCIPE DU MINIMUM DE PONTRYAGIN.....	33
3.1.2	LA PROGRAMMATION DYNAMIQUE	34
3.2	LES MÉTHODES DE RÉOLUTION	34
3.2.1	LES MÉTHODES DIRECTES.....	35
3.2.2	LES MÉTHODES INDIRECTES.....	35
4.	<u>APPLICATION À L'EFFACEMENT DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DE POINTE</u>	<u>35</u>
4.1	CONTEXTE : DÉSÉQUILIBRE DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE	36
4.2	ÉTAT DE L'ART DES MÉTHODES D'EFFACEMENT	37
4.2.1	LA « DEMAND SIDE RESPONSE (DSR) »	37
4.2.2	LES OFFRES D'EFFACEMENT DU FOURNISSEUR D'ÉLECTRICITÉ	38
4.2.3	LES TECHNIQUES D'EFFACEMENT AU NIVEAU DU BÂTIMENT	40
4.2.4	EXPÉRIMENTATIONS ET SITES PILOTES	43
5.	<u>CONCLUSION DU CHAPITRE.....</u>	<u>45</u>

1. LES OBJECTIFS DE LA RÉGULATION

De nombreux objectifs sont associés à la régulation énergétique des bâtiments, dont les principaux sont la réduction des consommations énergétiques et le maintien du confort de l'occupant.

La maîtrise de la consommation énergétique du bâtiment peut être assurée en profitant des apports externes (rayonnement solaire, fraîcheur de la nuit) et internes (énergie dissipée par les occupants et les équipements). Cependant, il peut exister un décalage temporel entre le moment où l'apport est disponible et l'instant où il serait le plus utile. L'utilisation de capacités de stockage du bâtiment est alors une réponse pertinente pour décaler dans le temps la restitution des apports. Par exemple, dans le cas de la climatisation, il est possible d'utiliser l'inertie thermique du bâtiment et sa capacité à stocker les apports excédentaires pendant la journée pour les évacuer la nuit grâce à un système de ventilation. Il s'agit des techniques de *night cooling* ou *free cooling* qui valorisent le froid « gratuit » par la mise en place d'une ventilation (naturelle ou forcée) lorsque la température extérieure est plus basse la nuit. Ces techniques s'appliquent principalement à des bâtiments tertiaires soumis à de fortes charges internes et permettent ainsi de réduire les demandes de climatisation pendant la journée (Braun et al. 2001 ; Chahwane 2011). Concernant le logement, la diminution des consommations de chauffage en hiver est un autre cas d'application. Le but est alors de profiter au maximum des apports solaires en prévoyant à l'avance l'évolution des conditions météorologiques extérieures (Nygard Ferguson 1990 ; Bauer 1998). Une gestion optimale des charges de chauffage permet ainsi de réduire la consommation énergétique du bâtiment (Ky Le 2008 ; Malisani 2012). Enfin, une dernière application concerne la réduction de la consommation d'électricité en période de pointe lors de la période estivale avec le contrôle de la climatisation (principalement pour les bâtiments tertiaires) ou lors de période hivernale avec le contrôle du système de chauffage (Greensfelder et al. 2011 ; Favre 2013).

La régulation énergétique du bâtiment peut également répondre à des objectifs de maintien ou d'amélioration du confort de l'occupant. La qualité de vie dans un bâtiment peut ainsi être définie par plusieurs facteurs :

- le confort thermique ;
- le confort visuel ;
- le confort acoustique ;
- la qualité de l'air intérieur.

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour évaluer le confort thermique. Une des approches les plus simples consiste à définir des seuils de confort (en °C) et à quantifier le dépassement de ces seuils par la température du local. Par exemple, l'inconfort thermique peut être caractérisé par le pourcentage de temps d'occupation où la température du local est supérieure ou inférieure à ces seuils de confort. La température du local est souvent caractérisée par la température opérative correspondant à une moyenne des échanges convectifs (température de l'air) et des échanges radiatifs

Chapitre 1 : La régulation énergétique des bâtiments

(température des parois). Une deuxième approche repose sur la méthode de Fanger et l'utilisation de deux indices pour évaluer le confort thermique d'une pièce (Fanger 1970 ; Humphreys et Nicol 2002) : l'indice PMV (*Predicted Mean Vote*) et l'indice PPD (*Percentage of People Dissatisfied*). Enfin, l'approche adaptative, intégrant dans sa réflexion la capacité d'adaptation climatique et la capacité d'interaction de l'occupant avec son environnement, peut être également employée (Nicol et Humphreys 2002).

Le confort visuel peut quant à lui être évalué par le niveau d'éclairement (exprimé en lux). Différentes normes existent telles que la norme ISO 16817 :2012 ou la norme NF EN 12464-1. Elles définissent les exigences d'éclairage selon les types de bâtiments (bureaux, logement, école, etc.) et selon les activités exercées à l'intérieure de ces bâtiments.

Pour le confort acoustique, la réglementation fixe des performances minimales selon les types de bâtiments et les usages. En particulier, l'isolation acoustique (exprimée en dB) aura pour but de se protéger des bruits extérieurs. Par exemple la réglementation thermique 2012 ¹(annexe II de la RT2012) définit trois classes d'exposition des bâtiments au bruit des infrastructures de transport.

Enfin, la qualité de l'air intérieure (QAI) est un aspect du confort à ne pas négliger. Ainsi, différentes réglementations (en France, l'arrêté du 24 mars 1982) fixent des taux minimaux de renouvellement d'air des volumes considérés en fonction du type d'activité et du nombre d'occupants. Cette qualité de l'air intérieure est fonction de l'entrée de polluants extérieurs mais également de polluants intérieurs provenant des matériaux, des équipements et de l'occupation même (Deoux et Deoux 2002). Par exemple, la QAI est couramment estimée par l'utilisation d'un indicateur mesurant la concentration de dioxyde de carbone (CO₂) dans le bâtiment, cette concentration provenant principalement de la présence des occupants dans le bâtiment. Le renouvellement d'air et la ventilation forcée sont les moyens utilisés pour contrôler la qualité de l'air intérieur (Emmerich et Persily 2001 ; Wang et Xu 2004).

Les objectifs de confort peuvent entrer en conflit avec les objectifs de réduction des consommations énergétiques. Par exemple, une modification des températures de consigne de chauffage pour diminuer les consommations énergétiques peut entraîner un non-respect du confort de l'occupant. De même, une trop forte variation de la température de consigne provoque l'inconfort. Pour cela, des régulations multi-objectifs existent qui ont pour but de diminuer les consommations énergétiques tout en respectant le confort de l'occupant. Il s'agit alors de minimiser une fonction de coût global sous des contraintes de confort (Malisani 2012 ; Favre 2013).

La régulation énergétique des bâtiments répond donc à différents objectifs, dont les principaux sont la réduction des consommations énergétiques et le maintien ou l'amélioration du confort des occupants. Pour répondre à ces objectifs, différentes commandes leur sont associées telles que le contrôle du chauffage, de la climatisation, de la ventilation (naturelle ou forcée), de l'éclairage, des ouvrants ou encore des protections solaires.

¹<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000026871753&dateTexte=&categorieLien=id>

Dans cette thèse, nous allons nous concentrer sur l'utilisation de la régulation énergétique des bâtiments pour réaliser l'effacement du chauffage lors des périodes de pointe de consommation électrique.

2. ÉTAT DE L'ART DES SYSTÈMES DE RÉGULATION

2.1 Introduction

Suite à la présentation des différents objectifs et commandes associées d'une régulation énergétique appliquée au bâtiment, il est possible de dresser un état de l'art des différentes méthodes existantes.

Dans un système de régulation, on peut distinguer d'une part le système physique sur lequel s'applique la régulation, et d'autre part le système de régulation.

Le système physique est composé de différents éléments tels que :

- **le bâtiment et ses différents systèmes** (chauffage, climatisation, etc.) sur lesquels est appliquée la régulation ;
- **les occupants** qui imposent des contraintes de confort ;
- **les sollicitations** telles que la météorologie, les apports internes dus aux occupants et aux équipements, ainsi que les caractéristiques du site (masques du bâtiment, climat local).

Quant aux paramètres du système de régulation, on peut citer :

- **la commande** correspondant au système piloté par la régulation, tels que les systèmes de chauffage, de climatisation, de ventilation, ou les protections solaires ;
- **les contraintes** qui portent aussi bien sur le système physique (températures de confort à ne pas dépasser, variation de température à respecter, etc.) que sur les paramètres propres au système de régulation (puissance de chauffage limitée, temps de calculs à respecter, etc.) ;
- **la fonction objectif** (dans le cas de la régulation optimale) qui sert de critère pour déterminer la meilleure solution au problème d'optimisation. Ce critère peut être de minimiser la consommation énergétique, de maximiser le confort, ou de minimiser le coût d'une consommation énergétique par exemple.

Les systèmes de régulation ont alors pour but de suivre une consigne donnée ou de minimiser une fonction objectif donnée tout en respectant des contraintes fixées. L'utilisation ou non d'un modèle thermique de bâtiment permet alors de diviser en deux grandes catégories les systèmes de régulation existants. On trouvera une présentation détaillée des différentes méthodes de régulation dans l'article de Dounis et Caraiscos (2009) et la thèse de Morosan (2011).

2.2 Systèmes de régulation sans modèle thermique du bâtiment

Dans la plupart des bâtiments, les lois de commande utilisées pour les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC, ou en anglais HVAC : *Heating, Ventilation and Air Conditioning*) sont relativement simples. Ces systèmes de régulation ne reposent pas sur un modèle thermique du bâtiment et ont souvent pour objectif de maintenir le confort thermique en respectant une température de consigne.

2.2.1 Les régulateurs classiques

Les méthodes de régulation classiques correspondent à la mise en place d'un thermostat. Le plus souvent le système de régulation se compose d'un thermostat, d'un amplificateur et d'un mécanisme (ou moteur) pour actionner les vannes ou les commutateurs. Ainsi, on utilise des lois de commande de type tout-ou-rien (TOR) ou des régulateurs de type PID (Proportionnel intégral dérivé) pour respecter la température de consigne. Le régulateur PID est le système de contrôle classique lié aux rétroactions le plus utilisé. Pour le réglage du PID, plusieurs règles existent (dont certaines permettent à ses paramètres d'évoluer au cours du temps) telles que celles de Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Chien-Hrones-Reswick ou encore Lee-Park-Lee-Brosilow². Cependant, ces systèmes sont incapables d'anticiper un changement des sollicitations ou des contraintes. Une alternative classique consiste alors à utiliser des systèmes de régulation avancés reposant sur une approche dite intelligente.

2.2.2 Les régulateurs avancés

Ce type de contrôle, appelé généralement BIEMS (*Building Intelligent Energy Management Systems*), a pour objectif de parvenir à un contrôle simple, adaptatif et performant sans avoir recours à un modèle thermique du bâtiment. Une approche courante repose sur l'utilisation de lois heuristiques.

Ces stratégies de régulation reposent fréquemment sur l'utilisation d'arbres de décision : à partir des différentes sollicitations mesurées ou prédites auxquelles le bâtiment est soumis (par exemple les conditions météorologiques, ou l'occupation du bâtiment) ainsi que de la mesure des sorties (ou de l'estimation de l'état) du bâtiment, des lois heuristiques (ou règles de décision) sont utilisées pour déterminer la commande à appliquer à chaque système énergétique. La Figure 1 illustre le fonctionnement de ce type de régulateur.

² N. Petit, P. Rouchon, Dynamique et contrôle des systèmes, Cours, MINES ParisTech, 2014

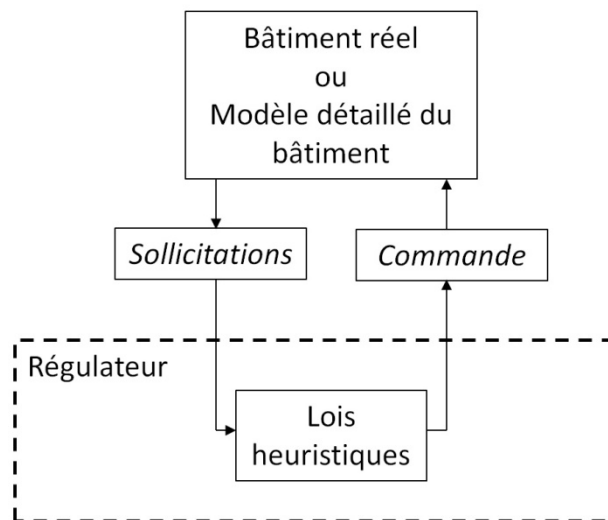


Figure 1 : Régulateur basé sur des lois heuristiques, adapté de Coffey (2012)

Cependant, plus le bâtiment est performant énergétiquement, plus les interactions et effets de couplage entre celui-ci, son environnement, ses systèmes énergétiques et ses usages deviennent importants. Il devient alors difficile de définir, de manière intuitive, des lois heuristiques et un mode de fonctionnement optimal. Par conséquent, pour assurer le confort des occupants et maintenir les performances énergétiques du bâtiment, les stratégies de régulation doivent pouvoir s'adapter en continu aux usages et conditions environnementales changeantes. Elles doivent également anticiper l'état futur du bâtiment (à travers un modèle thermique du bâtiment) ainsi que l'évolution de différents paramètres tels que les conditions météorologiques, les tarifs ou le contenu CO₂ de l'électricité pour déterminer la gestion optimale des flux d'énergie.

Une alternative consiste alors à utiliser des méthodes de régulation plus avancées permettant de résoudre des problèmes d'optimisation complexes. Ces techniques reposent sur l'application de la commande prédictive (ou MPC pour *Model Predictive Control*) avec l'utilisation d'un modèle thermique du bâtiment.

2.3 Système de régulation avec modèle thermique du bâtiment

2.3.1 Les modèles thermiques du bâtiment

Un modèle thermique dynamique du bâtiment est nécessaire lorsque le système de régulation doit anticiper des changements futurs au niveau des contraintes ou des sollicitations. Le système réel (ici le bâtiment) est alors décrit par un ensemble d'équations mathématiques qui permet de représenter la relation existante entre les entrées et les sorties du système.

Chapitre 1 : La régulation énergétique des bâtiments

Il est possible de diviser les modèles en trois catégories en fonction des informations utilisées pour leur conception :

- les modèles de type « boîte blanche » ou modèles de connaissance ;
- les modèles de type « boîte noire » ou modèles de comportement ;
- les modèles de type « boîte grise » ou modèles semi-physiques.

2.3.1.1 Modèle de type « boîte blanche »

Les modèles de type boîte blanche (ou modèles de connaissance) reposent sur la description physique du système. Il s'agit de modèles physiques construits à partir de l'application de lois générales ou de lois empiriques qui régissent les phénomènes intervenant au sein du système. Ces modèles comportent uniquement des paramètres physiques.

Selon le niveau de détail voulu, le modèle peut contenir quelques dizaines à quelques milliers d'équations, entraînant des temps de modélisation et de calcul variables. Selon le type d'équations utilisées, ces modèles peuvent être classifiés en :

- modèles linéaires et modèles non-linéaires ;
- modèles continus ou discontinus.

Dans le cadre de la modélisation thermique d'un bâtiment, de nombreux logiciels de simulation thermique dynamique des bâtiments ont été développés et peuvent être considérés comme des modèles de type boîte blanche. On peut citer par exemple EnergyPlus³, ESP-r⁴ ou Pléiades+COMFIE⁵. Un état de l'art portant sur une vingtaine d'outils a été réalisé en 2008 (Crawley et al. 2008). L'utilisation de ces logiciels requiert une connaissance précise de la composition des parois et des métrés du bâtiment à modéliser.

2.3.1.2 Modèle de type « boîte noire »

Les modèles de type boîte noire (ou modèle de comportement) sont des modèles non physiques construits sur la base de mesures effectuées sur les entrées et les sorties du système à modéliser. La modélisation consiste alors à utiliser les mesures disponibles pour estimer les paramètres des équations reliant les entrées aux sorties dans le but d'obtenir la meilleure précision possible. Ces paramètres sont traditionnellement identifiés de manière automatique (Ljung 1999).

On distingue généralement deux approches pour les modèles de type boîte noire : les modèles linéaires et les modèles non-linéaires. Les modèles linéaires correspondent à l'utilisation de fonctions de transfert pour représenter le lien entre les entrées et les sorties du système. On peut citer par exemple (Henze et Neumann 2012) les modèles de type FIR (*Finite Impulse Response*), ARX (*Autoregressive with*

³ Source : <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

⁴ Source : <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>

⁵ Source : <http://www.izuba.fr/logiciel/pleiadescomfie>

Chapitre 1 : La régulation énergétique des bâtiments

external input), ARMAX (*Autoregressive moving average and external input*), ARMA (*Autoregressive moving average*) ou encore BJ (Box-Jenkins). Ils peuvent être définis de manière générale par :

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t) \quad (1.1)$$

avec :

- $u(t)$: entrées mesurées ;
- $y(t)$: sorties mesurées ;
- $e(t)$: perturbations ;
- q : l'opérateur de recul avec $q^{-1}u(t) = u(t - 1)$ et $A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n}$;
- A, B, C, D et F : matrices ou polynômes.

Les modèles non-linéaires correspondent quant à eux à l'utilisation de réseaux de neurones. Un réseau de neurones artificiels (ou ANN pour *Artificial Neural Network*) est un modèle de calcul qui essaie de copier le fonctionnement des neurones biologiques. Les neurones composant le réseau sont organisés en plusieurs couches et reliés entre eux de manière pondérée. Le comportement de ce système est acquis lors de la phase d'apprentissage où il est confronté à des données issues du problème à traiter. Il ajuste alors la valeur de ses poids pour obtenir des résultats similaires à ceux présentés lors de la phase d'apprentissage.

2.3.1.3 Modèle de type « boîte grise »

Les modèles de type boîte grise correspondent à des modèles hybrides combinant des modèles de type boîte blanche et boîte noire. Ces modèles peuvent s'appliquer à des modèles globaux combinant d'une part des modèles de connaissance et d'autre part des modèles de comportement. Ils peuvent également correspondre à un modèle de type boîte blanche complété par un modèle de type boîte noire dans le but de modéliser des paramètres non pris en compte par le modèle physique.

2.3.2 La commande prédictive

Dans le cadre du bâtiment, les systèmes de régulation reposant sur un modèle thermique du bâtiment utilisent la technique de la commande prédictive. Contrairement aux régulateurs classiques, dans la commande prédictive la minimisation de la fonction objectif est réalisée en prenant en compte l'état actuel et futur du bâtiment par la prévision de l'évolution des sollicitations extérieures et intérieures. Cette méthode consiste ainsi en une résolution répétée à chaque période d'échantillonnage du régulateur (fixé par l'utilisateur) d'un problème de commande optimale, c'est-à-dire comment aller d'un état actuel à un état objectif de manière optimale tout en respectant les contraintes. À chaque période d'échantillonnage, une séquence de commande optimale (minimisant la fonction coût) est calculée en boucle ouverte sur un horizon de prédiction fixe. Cependant, seule la première commande est appliquée et la procédure est reprise à la période d'échantillonnage suivante (principe de l'horizon fuyant). La Figure 2 illustre le fonctionnement de la commande prédictive sur un horizon de prédiction $N\Delta t$.

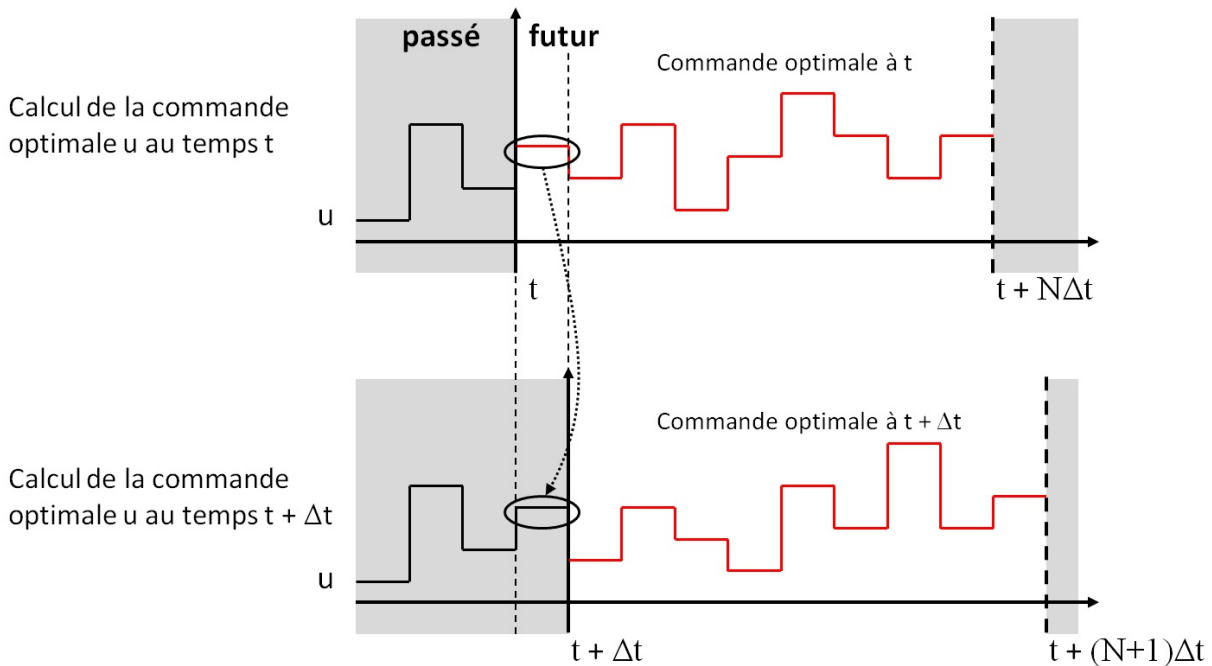


Figure 2 : Fonctionnement de la commande prédictive

Initiée par Richalet et al. (1978) la commande prédictive est aujourd'hui une technique classiquement utilisée dans différents domaines industriels (pétrochimie par exemple) où le respect des contraintes dans le processus industriel est particulièrement important. Il s'agit d'un thème de recherche encore actif dont la théorisation est plus récente que les applications. Une revue détaillée de la théorie de la commande prédictive est disponible dans Mayne et al. (2000). Récemment, l'utilisation de la commande prédictive dans le domaine du bâtiment s'est développée, comme en attestent de nombreux travaux de recherche (Chen 2002 ; Henze et al. 2005 ; Freire et al. 2008 ; Moroşan et al. 2010 ; Prívará et al. 2011 ; Oldewurtel et al. 2012 ; Prívará et al. 2012 ; Corbin et al. 2013 ; Touretzky et Baldea 2014). La Figure 3 illustre l'application de la commande prédictive à la régulation d'un bâtiment.

Chapitre 1 : La régulation énergétique des bâtiments

Cette technique a été longtemps pénalisée par le coût élevé de la technologie nécessaire à l'implémentation et la difficulté d'obtenir un modèle mathématique du bâtiment satisfaisant. Mais suite aux évolutions récentes des moyens de calculs (permettant l'exécution rapide de calculs complexes) et de la disponibilité de capteurs fiables et bon marché, cette technologie devient de plus en plus accessible. Cependant, elle reste encore éloignée des pratiques courantes des professionnels du bâtiment, en particulier concernant l'utilisation de règles expertes dans les systèmes de régulation. Une alternative consiste alors à utiliser des méthodes d'optimisation hors-ligne permettant d'identifier des lois de commande simplifiées.

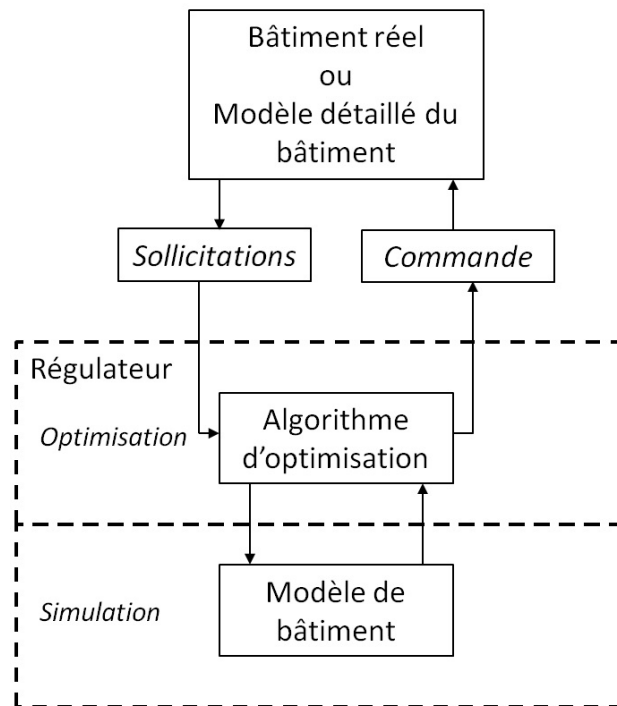


Figure 3 : Régulateur basé sur la commande prédictive, adapté de Coffey (2012)

2.3.3 L'optimisation hors-ligne

Une première méthode consiste à résoudre de manière explicite le problème de commande prédictive, l'objectif étant d'obtenir une formulation explicite des lois de commande. Au cours des dernières années, le développement ou l'utilisation de différentes méthodes – la programmation multiparamétrique (Bemporad et al. 2002), la programmation dynamique (J. B. Mare 2004) ou encore l'utilisation des polyèdres paramétrés (Olaru 2005) – a permis la description explicite de la loi de commande pour certains problèmes de commande prédictive. L'expression de la loi prédictive est alors calculée hors-ligne et stockée dans une table d'interpolation (« *look-up table* »). Ainsi, au lieu de résoudre un problème d'optimisation en ligne à chaque pas de temps, il suffit d'évaluer la fonction explicite stockée (classiquement une fonction affine par morceaux). Plus précisément, l'utilisation classique de la commande prédictive consiste à résoudre un problème d'optimisation paramétré par l'état actuel (mesuré) du système. En revanche, s'il est possible de résoudre le problème d'optimisation pour tous les états possibles du système (optimisation « hors-ligne »), il n'est alors plus nécessaire de

résoudre le problème d'optimisation à chaque pas de temps (optimisation « en ligne »). Cette méthode permet ainsi de fournir des lois de commande optimale qui couvrent l'ensemble de l'espace des états. Cependant, cette méthode est difficilement applicable au cas de la régulation énergétique du bâtiment. Une alternative a été proposée consistant à approximer la résolution explicite de la commande prédictive (Coffey 2012). Pour diminuer la dimension du problème, l'idée est de résoudre la commande prédictive seulement sur un ensemble de points déterminés à l'avance (sollicitations extérieures, état initial du bâtiment) et de réaliser des interpolations entre les différents points de la grille. Bien qu'intéressante, la mise en œuvre de cette méthode nécessite de grandes capacités de calculs.

Une deuxième méthode pour approximer les résultats de la commande prédictive est de minimiser la fonction objectif du problème d'optimisation en simulant le bâtiment sous des sollicitations extérieures et intérieures représentatives d'une année type. A partir des résultats obtenus on peut alors identifier une loi de commande à fournir au système de régulation (à travers des lois de commande heuristique par exemple), et l'utiliser pour la gestion en temps réel du bâtiment. L'objectif ici est de fournir des stratégies générales de gestion énergétique pour minimiser la consommation d'énergie ou les coûts de fonctionnement. Cette approche a par exemple été utilisée pour identifier des lois de commande d'un système automatisé de protection solaire d'un bâtiment (Le et al 2014) ou encore pour le contrôle de l'ouverture des fenêtres (May-Ostendorp et al. 2013).

Dans cette thèse, nous allons développer des stratégies de gestion énergétique reposant d'une part sur l'élaboration de lois heuristiques à partir des résultats de la stratégie optimale calculée par la commande optimale (optimisation « hors-ligne ») et d'autre part sur l'application directe de la commande prédictive (optimisation « en ligne »). Une présentation de la théorie de la commande prédictive et de la commande optimale est alors indispensable.

3. THÉORIE DE LA COMMANDE PRÉDICTIVE

La commande prédictive présente l'avantage d'utiliser un modèle dynamique du système à contrôler permettant d'anticiper son comportement futur. Dans cette méthode, la séquence de commande optimale à appliquer au système est déterminée par la résolution, à chaque période d'échantillonnage, d'un problème de commande optimale consistant à maximiser une fonction objectif ou minimiser une fonction coût. Nous allons nous intéresser dans la suite au principe de la commande optimale ainsi qu'aux méthodes de résolution.

3.1 La commande optimale

La théorie de la commande optimale propose des méthodes mathématiques permettant d'étudier des systèmes dynamiques. Le problème de commande optimale consiste à déterminer la commande d'un système qui minimise un critère donné (fonction de coût) sous des contraintes d'état et/ou de commande. Dans le cadre de cette thèse, il s'agit de déterminer la loi de commande de chauffage qui

Chapitre 1 : La régulation énergétique des bâtiments

minimise le coût de la consommation de chauffage sous des contraintes de température (contraintes d'état) et de puissance de chauffage (contraintes de commande).

On s'intéresse tout d'abord au problème général de commande optimale (sans contraintes d'état) s'écrivant sous la forme suivante :

$$\min_{u \in U} \left[J(u) = \int_0^{t_f} L(x^u(t), u(t)) dt \right] \quad (1.2)$$

sous la contrainte de dynamique suivante :

$$\dot{x}^u(t) = f(x^u(t), u(t)) \quad ; \quad x(0) = x_0 \quad (1.3)$$

où L est une fonction à valeur réelle régulière de ses arguments, et où $x^u(t)$ et $u(t)$ sont respectivement l'état et le contrôle qui satisfont l'équation différentielle (1.3). Dans le cadre de cette thèse, l'équation différentielle (1.3) correspond à la représentation sous forme d'état de la dynamique du bâtiment, $x^u(t)$ représente l'état du bâtiment au temps t et $u(t)$ la puissance de chauffage à injecter dans le bâtiment au temps t .

On peut ainsi agir sur l'état x à travers la variable de commande u sur l'horizon de temps $[0; t_f]$. L'ensemble U représente l'ensemble des commandes admissibles tel que les contraintes de commande soient respectées. Le problème de commande optimale consiste alors à trouver la commande u et l'état associé x^u solution de l'équation différentielle (1.3) et minimisant le critère intégral (1.2).

La théorie de la commande optimale comporte deux grandes approches : le principe du minimum de Pontryagin et la programmation dynamique. Nous discuterons des différences entre les deux approches dans les sections suivantes.

3.1.1 Le principe du minimum de Pontryagin

Le principe du minimum de Pontryagin donne une condition nécessaire (mais non suffisante) d'optimalité. Si le contrôle $u^* \in U$ associé à la trajectoire $x^* \in \mathbb{R}^n$ est solution du problème de commande optimale, alors il existe une application $p(\cdot) : [0; t_f] \rightarrow \mathbb{R}^n$ appelée vecteur adjoint telle que, pour presque tout $t \in [0; t_f]$:

$$\dot{x}^*(t) = \frac{\partial}{\partial p} H(x^*(t), u^*(t), p(t)) \quad (1.4)$$

$$\dot{p}(t) = -\frac{\partial}{\partial x} H(x^*(t), u^*(t), p(t)) \quad (1.5)$$

$$H(x^*(t), u^*(t), p(t)) = \min_u H(x^*(t), u(t), p(t)) \quad (1.6)$$

où $H(x(t), u(t), p(t)) = L(x(t), u(t)) + p(t)^t f(x(t), u(t))$ est l'Hamiltonien du système.

Cette condition nécessaire pour trouver un contrôle optimal nous amène alors à la résolution du système suivant :

$$\begin{aligned}
 \dot{x}^u(t) &= f(x^u(t), u(t)) \\
 x(0) &= x_0 \\
 \dot{p}(t) &= -\frac{\partial}{\partial x} H(x(t), u(t), p(t)) \\
 p(t_f) &= 0 \\
 u(t) &\in \underset{v}{\text{arg min}} H(x(t), v(t), p(t))
 \end{aligned} \tag{1.7}$$

La méthode de résolution de ce système est présentée dans le §3.2.2. L'extension du problème de commande optimale à des contraintes d'état (contraintes de température) est possible par l'utilisation de méthodes de points intérieurs par exemple (Malisani, et al. 2014). Cette méthode sera présentée dans le chapitre 5.

3.1.2 La programmation dynamique

Cette approche est basée sur le principe d'optimalité de Bellman (1957) qui stipule : « Une suite de commande est optimale si, quels que soient l'état et l'instant considérés sur la trajectoire qui lui est associée, les commandes ultérieures constituent, pour le problème ayant cet état et cet instant comme conditions initiales, une suite de commande optimale ».

On considère ici le système :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad ; \quad x(t_0) = x_0 \tag{1.8}$$

et on s'intéresse au problème de commande optimale :

$$\min_{u \in U} \left[J_{x_0, t_0}(u) = \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), u(t)) dt \right] \tag{1.9}$$

On définit alors la fonction valeur V sur $\mathbb{R}^n \times [0; t_f]$. Il s'agit de la fonction ayant pour valeur la valeur optimale pour le problème (1.8)-(1.9) avec pour condition initiale (x_0, t_0) :

$$V(x_0, t_0) = \inf_{u \in U} \{ J_{x_0, t_0}(u) \} \tag{1.10}$$

D'après le principe de Bellman, il est possible d'établir que la fonction valeur V du problème de commande optimale est solution d'une équation aux dérivées partielles non linéaire appelée équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) :

$$\frac{\partial}{\partial t} V(x_0, t_0) + \inf_{v \in U} H \left(x_0, v, \frac{\partial}{\partial x} V(x_0, t_0) \right) = 0 \tag{1.11}$$

Cette approche a l'avantage d'être nécessaire et suffisante, mais présente des inconvénients en termes de temps de calcul et d'encombrement de mémoire.

3.2 Les méthodes de résolution

Il existe deux types de méthodes numériques de résolution en commande optimale : les méthodes directes et les méthodes indirectes (Trélat 2005).

3.2.1 Les méthodes directes

Les méthodes directes consistent à discrétiser l'état et le contrôle et à ramener le problème à un problème d'optimisation non-linéaire en dimension finie (ou problème de programmation non-linéaire). La résolution numérique peut être effectuée par une méthode de pénalisation ou par une méthode SQP (*Sequential Quadratic Programming*) par exemple. Pour accélérer la résolution numérique du problème, des méthodes d'inversion peuvent par exemple être employées dont l'objectif est de ne paramétrer que les états minimaux et d'en déduire les autres états et les commandes par dérivées (Petit et al. 2001 ; Chaplais et Petit 2008, ; Petit et Sciarretta 2011). Les méthodes directes ont l'avantage d'être simples à mettre en œuvre et d'être peu sensibles au choix de la condition initiale. En revanche, elles ont l'inconvénient d'être peu précises et d'être gourmandes en mémoire. Betts (2010) présente une étude complète sur les méthodes directes et leur mise en œuvre numérique.

3.2.2 Les méthodes indirectes

Les méthodes indirectes consistent à résoudre par une méthode de tir un problème aux valeurs limites obtenu par l'application du principe du minimum de Pontryagin. Ce dernier donne les conditions nécessaires d'optimalité et permet d'exprimer la commande comme une fonction de l'état et de l'état adjoint ($u(t) = \Gamma(x(t), p(t))$). Ces conditions nécessaires d'optimalité amènent alors à résoudre un problème aux deux bouts (avec une condition initiale sur l'état et une condition finale sur l'état adjoint). L'idée de l'algorithme de tir est alors d'introduire une inconnue, à savoir la valeur initiale de l'état adjoint p_0 et de considérer la fonction de tir qui à p_0 associe la condition finale $p(t_f)$, où (x, p) est solution du problème de Cauchy (permettant d'établir l'existence et l'unicité d'une solution) sur $[0, t_f]$:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), \Gamma(x(t), p(t))), & x(0) &= x_0 \\ \dot{p}(t) &= -\frac{\partial}{\partial x} H(x(t), \Gamma(x(t), p(t)), p(t)), & p(0) &= p_0 \end{aligned} \quad (1.12)$$

On se ramène donc à chercher un zéro d'une fonction, ce qui peut être réalisé par une méthode de Newton.

La méthode de tir a l'avantage d'être très précise et d'avoir un coût numérique faible. Cependant, la convergence de la méthode nécessite une bonne initialisation de p_0 , ce qui peut être difficile à obtenir en pratique.

4. APPLICATION À L'EFFACEMENT DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DE POINTE

L'utilisation d'un système de régulation anticipatif prend toute son importance lorsque le système doit anticiper des variations brusques des sollicitations ou des contraintes. C'est en particulier le cas pour des politiques d'incitation à l'effacement de la consommation électrique de pointe où la grille tarifaire de l'électricité peut subir des variations importantes. Dans la suite de ce chapitre, on se propose

de faire un rapide état de l'art des différentes stratégies de régulation existantes appliquées à l'effacement de la consommation électrique de pointe.

4.1 Contexte : déséquilibre du réseau électrique

Les caractéristiques actuelles de la production d'électricité positionnent le secteur électrique au cœur des tensions énergétiques et plus précisément de l'enjeu sociétal qu'est l'équilibre de la production et de la consommation électrique. En effet, dans le « bilan prévisionnel » publié en 2012 (RTE 2012), RTE observe que sur les dix dernières années la pointe électrique a augmenté 2,5 fois plus vite que l'énergie consommée. A titre d'exemple, lors de la vague de froid de février 2012, la France a connu une pointe de consommation à 102,1 GW. Ainsi, RTE prévoit que la sécurité d'alimentation électrique devrait être assurée jusqu'en 2015 mais qu'à partir de 2016, elle devient plus difficile en raison notamment de la fermeture de certaines centrales thermiques à énergie fossile. La puissance manquante est alors estimée à 1,2 GW en 2016 et à 2,1 GW en 2017.

Ces pointes de consommation électrique sont de différentes natures et dépendent de la période (journée, saison) et de la zone géographique. Il en existe deux types :

- **La pointe journalière** : elle correspond au moment où la consommation électrique totale en France est la plus importante de la journée. Elle est caractérisée par une hausse importante de la consommation pendant quelques heures. En hiver, cette pointe est observée à 19 h et correspond à la mise en service simultanée de plusieurs appareils électriques (chauffage, éclairage, télévision, cuisson, etc.). En été, la pointe est plutôt observée à 13 h.
- **La pointe saisonnière** : elle correspond à une augmentation de la consommation électrique pour répondre aux besoins de chauffage des bâtiments lors de la période hivernale. Cette consommation est très sensible à la température en raison du fort équipement en chauffages électriques des bâtiments français. Ainsi RTE (2014) estime la thermosensibilité de la consommation électrique à 2400 MW par degré Celsius à 19 heures (c'est-à-dire que la baisse d'un degré Celsius entraîne une croissance de la puissance appelée de 2400 MW). Par exemple lors de la vague de froid de l'hiver 2011-2012, 40 % de la consommation d'électricité appelée était due au chauffage électrique. La Figure 4 illustre le phénomène de la pointe saisonnière.

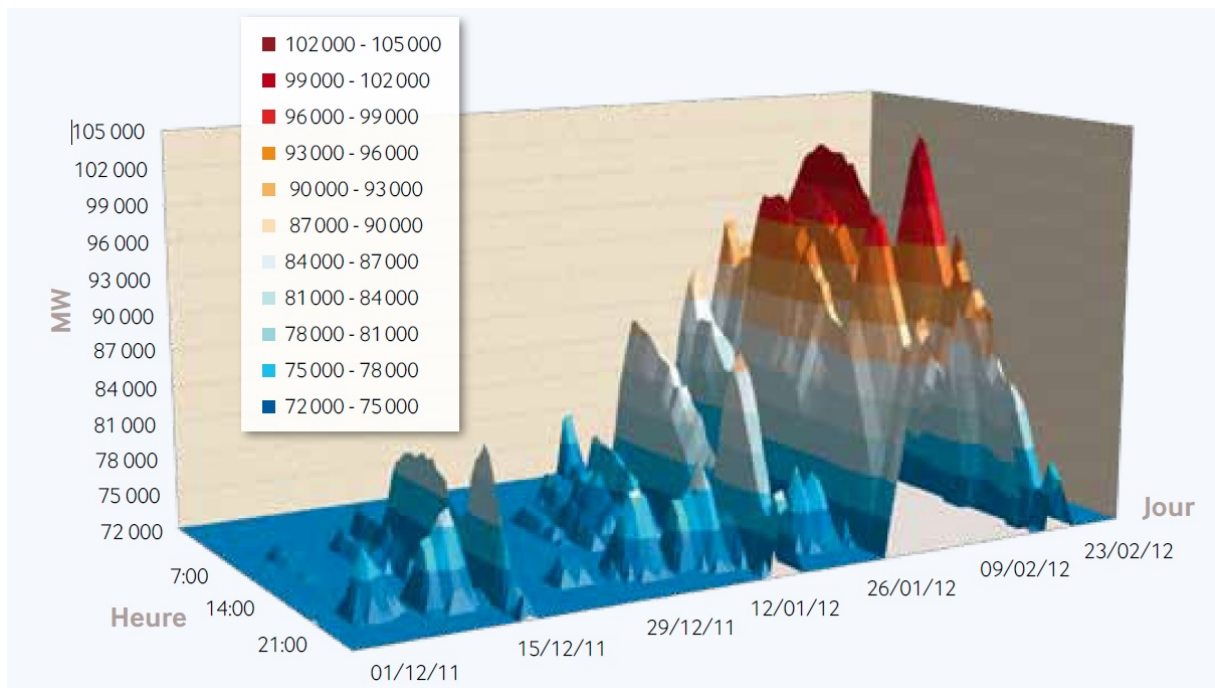


Figure 4 : Évolution de la consommation électrique en France sur l'hiver 2011-2012, extrait de RTE (2012)

Ces problèmes de gestion de la pointe électrique remettent en question la structure du système de production électrique français de type *top-down*, c'est-à-dire une production centralisée et donc « délocalisée » de la consommation d'énergie finale. C'est pourquoi des systèmes de type *bottom-up* qui favorisent la production à l'échelle du quartier et l'utilisation d'énergies renouvelables intégrées aux bâtiments sont à l'étude. Une autre méthode est de développer des stratégies d'effacement de la pointe électrique dans l'optique de lisser la courbe de charge. Un état de l'art sur ces méthodes d'effacement est proposé dans la suite.

4.2 État de l'art des méthodes d'effacement

4.2.1 La « Demand Side Response (DSR) »

La *Demand Side Response* (ou gestion de la demande) correspond aux stratégies d'effacement de la consommation électrique dans le but de lisser la courbe de charge. Elle permet ainsi d'impliquer les consommateurs en les incitant économiquement à consommer au bon moment en fonction des conditions du réseau électrique.

Il existe différentes méthodes de gestion de la demande. On peut citer par exemple :

- **Load shifting (report de la demande « longue durée »)** : correspond au report d'un usage sur la journée, sous la contrainte que la demande doit être satisfaite dans la journée. Il s'agit par exemple du déclenchement de l'ECS (Eau Chaude Sanitaire) en heure creuse. Les usages concernés sont par exemple le lave-linge, le sèche-linge, ou le lave-vaisselle. Cette gestion de la demande implique une influence sur les usages.

Chapitre 1 : La régulation énergétique des bâtiments

- **Peak Clipping (report de la demande « courte durée »)** : correspond au report à court terme d'un usage pour diminuer la pointe électrique. Les usages concernés sont la réfrigération, le chauffage, la climatisation, ou la ventilation. Cette gestion de la demande n'a que peu voire pas d'influence sur les usagers.
- **Valley filling** : le but est de lisser la courbe de charge en remplissant les heures creuses.

4.2.2 Les offres d'effacement du fournisseur d'électricité

4.2.2.1 Les offres en France

4.2.2.1.1 Les effacements tarifaires

Les options tarifaires telles que EJP (créée dans les années 1980) et Tempo (qui lui a succédé dans les années 1990) constituent le premier mécanisme d'effacement de consommation apparu historiquement et toujours le plus important en terme de réduction de puissance. Leur principe est d'inciter le consommateur à réduire sa consommation par un tarif très élevé sur 22 périodes mobiles (de 18 heures pour EJP, de 16 heures pour Tempo en jour rouge) réparties par le fournisseur entre le 1^{er} novembre et le 31 mars. En contrepartie, le tarif est plus attractif en dehors de ces périodes.

Cependant, la mise en extinction du tarif EJP bleu depuis 1998, puis du tarif Tempo bleu professionnel depuis 2004 ont entraîné une diminution de la puissance disponible pour atteindre 2000 MW sur l'hiver 2012-2013. Cette diminution progressive, estimée à 10 % par an, devrait perdurer dans les années à venir (RTE 2013). Ainsi, suite à l'article L 337-9 du code de l'énergie portant sur la fin des tarifs réglementés de vente jaune et vert, et entraînant la suppression d'une grande partie des contrats EJP, le volume d'effacement devrait être inférieur à 1000 MW en 2016.

4.2.2.1.2 Les effacements de marché

RTE propose également un mécanisme d'ajustement sous forme d'un appel d'offres permanent permettant en temps réel de disposer d'une réserve d'ajustement de puissance à la hausse comme à la baisse. Ainsi, un consommateur qui a la possibilité de réduire sa consommation peut déposer une offre, spécifiant la puissance effacée, le délai d'activation, et autres contraintes techniques, ainsi que le coût lié à l'activation. L'exploitant du système électrique commande alors l'activation de l'offre en fonction des besoins d'équilibrage du réseau électrique et selon la préséance économique et les conditions d'utilisation de l'offre.

4.2.2.1.3 Les autres effacements

Il existe d'autres formes d'effacements, tels que les contrats bilatéraux liant un consommateur à son fournisseur d'électricité contenant des clauses d'effacement contractuel. Ces contrats concernent principalement des établissements industriels très gros consommateurs, et représentent un potentiel

d'effacements estimé à 300 MW, auquel on peut ajouter 200 MW d'effacements « de crise » utilisables uniquement en cas de fortes tensions sur le réseau (RTE 2013).

4.2.2.2 Les offres à l'international

A l'international, différents modèles économiques sont utilisés dans les programmes de management de la demande (*Demand Side Response programs*). On peut distinguer deux grandes catégories : les programmes basés sur le temps (*time-based program*) et les programmes basés sur les incitations économiques (*incentive-based program*) (Federal Energy Regulatory Commission 2006 ; Marwan et Kamel 2011).

4.2.2.2.1 « Time-based programs »

Dans les programmes basés sur le temps, on peut citer :

- **Time of Use (TOU)** : il s'agit d'un des plus importants programmes de DSR qui a pour but d'encourager le consommateur à modifier ses comportements et ses usages (Sheen et al. 1994). Basée sur deux coûts de l'électricité, un tarif haut pour la période de pic (période de plusieurs heures) et un tarif bas pour la période hors pic, cette tarification n'applique pas de malus ou de bonus pour le consommateur. Pour participer, le consommateur doit décaler sa consommation d'énergie de la période de pic à la période hors pic dès qu'il reçoit l'information du fournisseur d'électricité. Le prix et le calendrier de chaque période est prédéterminé et constant.
- **Real time pricing (RTP)** : ce programme permet au consommateur d'avoir accès à des prix de l'électricité qui sont variables d'une heure et d'un jour à l'autre et basés sur les prix du marché de production de l'énergie (Moholkar et al. 2004).
- **Critical peak pricing** : dans ce programme, le prix de l'électricité est très élevé lors de la période de pic. Ces périodes sont limitées souvent à 10-15 h par an. Il existe deux types de politiques de prix : soit le prix et la durée de la période sont fixés à l'avance, soit le prix et la période peuvent varier suivant les demandes du réseau électrique.

4.2.2.2.2 « Incentive-based programs »

Dans les programmes basés sur des incitations, on peut trouver :

- **Direct load control (DLC)** : ces programmes concernent principalement le résidentiel ou les petits commerces. Il s'agit de dispositifs de contrôle direct, par un service public ou par un fournisseur d'énergie, de la charge d'équipements électriques (climatiseur, chauffe-eau) dans le but de réduire la demande d'énergie d'un client à certains moments.

- **Interruptible / curtailable (I/C)** : dans ce modèle, le consommateur signe un contrat dit « d'effacement » avec le fournisseur pour réduire sa consommation à certaines heures. Le fournisseur indique ensuite au consommateur les moments où il doit effacer sa consommation, et pénalise celui-ci s'il ne réduit pas sa consommation (Yu et al. 2005).
- **Demand bidding (DB)** : programme qui permet d'identifier les offres des consommateurs prêts à réduire leur consommation. Le fournisseur peut alors utiliser ces offres à un prix spécifique en fonction des besoins d'équilibrage du réseau.
- **Emergency demand response program (EDRP)** : particulièrement appliqué dans les moments où l'électricité est peu disponible comme lors d'évènements majeurs (événement sportif télévisé, vague de froid) qui impliquent des consommations hors du commun, le consommateur est financièrement récompensé pour chaque kWh non consommé lors de ces évènements (Tyagi et Black 2010).

4.2.2.2.3 Exemples de programmes

Suite à la crise de l'énergie en Californie de 2000 et 2001, des investisseurs ont mené l'étude *Statewide Pricing Pilot (SPP)* de juillet 2003 à décembre 2004. Cette étude a montré que les consommateurs pouvaient réduire leur consommation d'électricité de 7,6 % à 27 % lors des périodes de pic en réponse à une tarification dynamique de l'électricité (Faruqui et George 2005). Des études similaires sur l'utilisation de la tarification de l'électricité de type TOU ont été menées par la suite (Herter et al. 2007 ; Herter 2007).

La tarification TOU a été par la suite testée et implémentée dans plusieurs pays. Ainsi Faruqui et Sergici (2010) présentent au travers de 15 études les résultats de ce type de tarification. Par exemple, aux États-Unis, et plus précisément en Floride, le « *Gulf Power Select Program* » a permis de réduire la consommation d'électricité pendant les périodes de pointe de 41 %. De même en Norvège, il y a eu une réduction de 8 % à 9 % de consommation de l'électricité pendant ces mêmes périodes (Faruqui et Sergici 2010).

4.2.3 Les techniques d'effacement au niveau du bâtiment

Après une présentation des différentes offres d'effacement du fournisseur d'électricité, nous allons nous intéresser tout particulièrement dans cette thèse à la mise en place de stratégie de gestion énergétique dans le but d'effacer les consommations de chauffage. L'effacement des autres usages électriques domestiques (eau chaude sanitaire, équipements électriques) peut bien entendu être envisagé dans des programmes de gestion de la demande plus globaux (Da Silva 2011).

Différentes stratégies d'effacement du chauffage (ou de la climatisation) au niveau du bâtiment existent. Elles sont basées soit sur le tarif de l'électricité, soit sur l'utilisation de l'inertie thermique du bâtiment pour décaler la pointe de consommation électrique.

4.2.3.1 Techniques basées sur le tarif de l'électricité

Yang et al. (2013) ont développé une méthode de tarification prenant en compte à la fois le consommateur et le producteur d'électricité. La méthode se base sur une tarification de type TOU, où deux périodes sont considérées (une période de pic et une période de base), et sur une fonction de coût quadratique. Lors de la période de pic, le producteur détermine le tarif TOU en considérant le comportement du consommateur, alors que lors de la période de base, le consommateur répond au tarif TOU en décalant sa consommation d'électricité de la période de pic à la période de base. Les résultats montrent qu'une tarification adéquate pouvait générer aussi bien des profits pour le producteur qu'une réduction du coût de la consommation d'électricité pour le client.

L'utilisation d'une tarification de type TOU amène à développer de nouvelles méthodes pour optimiser les consommations d'énergies des consommateurs. Par exemple, Hämäläinen et Mäntysaari (2002) ont développé une approche multicritère pour le chauffage d'un bâtiment sous des contraintes de prix variable de l'électricité. Ils ont ainsi utilisé la méthode de « *dynamic goal programming* » dont le but est d'optimiser la température intérieure, c'est-à-dire le confort thermique, sous des critères de coût et de consommation d'énergie. L'utilisation de ces méthodes d'optimisation peut être envisagée pour estimer les réponses des consommateurs à la mise en place d'une politique de tarification dynamique (Hämäläinen et al. 2000; Pineau et Hämäläinen 2000).

4.2.3.2 Techniques basées sur l'inertie thermique du bâtiment

4.2.3.2.1 Effacement en été

Les techniques d'effacements basées sur l'inertie thermique du bâtiment peuvent tout d'abord s'appliquer en été. Le but est de maintenir un certain confort thermique dans le bâtiment à l'aide de son inertie en utilisant notamment la ventilation nocturne.

Par exemple, l'état du bâtiment peut être contrôlé par le biais des variations de température des différentes zones thermiques du bâtiment associées à un rafraîchissement nocturne dans le but de réduire la pointe électrique, de tirer partie d'un tarif avantageux de l'électricité et d'utiliser la ventilation naturelle la nuit plutôt qu'une ventilation mécanique (Braun 1990). Les résultats de cette méthode montrent qu'il est possible de réduire de manière significative la pointe électrique d'un bâtiment commercial ainsi que le coût de l'énergie par l'application du contrôle optimal de l'énergie stockée dans le bâtiment. Cependant, la performance dépend de nombreux facteurs, tels que le tarif de l'électricité, les caractéristiques techniques de la ventilation, la météo, l'occupation ainsi que l'inertie du bâtiment (Braun et al. 2001; Braun 2003). Dans une autre étude, l'utilisation intensive de la ventilation nocturne a permis de diminuer la puissance de refroidissement d'au minimum 43 % (Becker et Paciuk 2002).

Xu et al. (2004) ont appliqué une méthode similaire de pré-refroidissement d'un immeuble de bureaux. Après avoir défini un intervalle pour la température de confort (température minimale et maximale), l'idée est de maintenir le bâtiment à la température minimale de confort pendant la période occupée jusqu'à 14 h, puis de 14 h à 17 h (pendant les heures de pointe) la température de zone est

Chapitre 1 : La régulation énergétique des bâtiments

laissée libre et autorisée à atteindre la température maximale de confort. Grâce à cette stratégie, la puissance de refroidissement est réduite de 80 % à 100 %, sans problème de confort thermique. Une précédente étude avait démontré par simulation la possibilité de diminuer de 10 % à 15 % la pointe dans un immeuble de bureaux (Andersen et Brandemuehl 1992).

D'autres études ont été menées dans le passé, aussi bien pour des immeubles de bureaux que dans des laboratoires tests et ont toutes montré le potentiel des différentes techniques d'effacement en été. On peut citer par exemple Ruud et al. (1990) ; Coniff (1991) ; Sukkhir et al. (1993) ; Morris, Braun, et Treado (1994) ; Keeney et Braun (1996).

Sane et Guay (2008) ont étudié une technique d'optimisation dynamique en temps réel sur un horizon fini répondant à une problématique de « *demand response* » d'un bâtiment. Ils l'ont appliquée à des problèmes d'optimisation de type « minimax » (où l'on souhaite résoudre des problèmes du type $\min_x \max_t F_i(x)$). Les résultats ont montré que l'optimisation en temps réel pouvait réduire de manière significative le coût de l'énergie.

Enfin, Favre et Peuportier (2013) ont également étudié l'utilisation de la surventilation nocturne dans un bâtiment performant. La méthode d'optimisation employée est la programmation dynamique et les commandes étudiées concernent la ventilation forcée et la ventilation naturelle. Les résultats obtenus montrent que la ventilation naturelle est plus efficace pour maintenir le confort dans le bâtiment lors d'une période de forte chaleur que la ventilation forcée.

4.2.3.2 Effacement en hiver

Les techniques d'effacement en hiver ont pour but de stocker de la chaleur en utilisant différents systèmes tels que le stockage dans un ballon d'eau chaude ou encore l'utilisation de l'inertie thermique du bâtiment tout en maintenant un certain confort thermique.

Wyse (2011) a étudié deux niveaux d'isolation d'un bâtiment, avec d'une part un niveau d'isolation de l'enveloppe standard et d'autre part une maison passive. Utilisant le logiciel ESP-r, Wyse étudie la réponse du bâtiment à un effacement au cours d'une période hivernale. Il émet l'hypothèse qu'un maximum de 9 % du temps d'occupation pendant lequel la température est en-dessous de 18°C est acceptable (taux d'inconfort). Ses résultats indiquent qu'un effacement d'une heure pour une maison moyennement isolée est acceptable avec 6,4 % de taux d'inconfort, alors que pour la maison passive, le taux d'inconfort est de 0,9 % pour un effacement de 6 heures.

Hong et al. (2011) ont publié une étude qui avait pour but de déterminer le temps maximal d'effacement d'une maison typique du Royaume-Uni chauffée par une pompe à chaleur, prenant en compte le niveau d'isolation, l'influence de la météo et l'occupation. Ils étudièrent pour cela différents mécanismes de stockage de l'énergie : l'inertie du bâtiment, l'utilisation d'un ballon tampon de stockage ou l'augmentation de la température de consigne avant l'effacement. Les résultats montrent qu'il est possible de couper la pompe à chaleur pendant une heure sans effet significatif sur le confort de l'occupant. L'augmentation de la température de consigne de 2°C permet un effacement de 1,5 h, mais

Chapitre 1 : La régulation énergétique des bâtiments

entraîne une augmentation de 10 % de la consommation énergétique de la pompe à chaleur. Enfin, l'utilisation d'un ballon de stockage de 300 L entre la pompe à chaleur et le réseau de distribution permet également un effacement de 1,5 h contre 2 h pour un ballon de 500 L, avec une légère diminution de la consommation d'énergie par rapport au cas de base.

Favre et Peuportier (2012) ont étudié la possibilité de décaler une partie de la consommation du chauffage d'un bâtiment en utilisant sa masse thermique. Pour cela, ils ont utilisé la méthode de la programmation dynamique pour minimiser une fonction de coût, tenant compte d'une tarification différenciée (heures creuses, pleines et de pointe) sous des contraintes de confort (température minimale et gradient de température maîtrisé) et de puissance maximale de l'équipement. Les deux cas d'étude correspondent au même bâtiment, avec une variante de type BBC et une autre peu isolée. Dans le cas de la maison peu isolée, les résultats de l'optimisation montrent qu'il y a un effacement partiel pendant les heures de pointe mais qu'il est nécessaire de chauffer les pièces à plus de 25°C avant l'effacement pour maintenir une température de confort de 19°C. Ils constatent également une forte variation de la température intérieure qui passe de 19°C à 26°C pendant les périodes d'heures creuses de 1 h à 8 h du matin, ainsi qu'une chute brutale de cette dernière de plus de 2,2°C par heure pendant les heures pleines. Dans le cas de la maison BBC, l'effacement des heures de pointe est complet (une partie des heures pleines est également effacée) alors que la variation de la température intérieure ne dépasse pas 1,4°C par heure. Enfin, par rapport à une régulation classique qui consiste à maintenir la température intérieure à 19°C, l'effacement des heures de pointe pour la maison BBC permet de réaliser 18 % d'économie sur la facture énergétique (en fonction des hypothèses tarifaires prises).

4.2.4 Expérimentations et sites pilotes

L'effacement des consommations résidentielles, ou effacement diffus, présente potentiellement de nombreux avantages, tels que la diminution du recours à la production d'électricité par centrales thermiques ou encore une meilleure insertion des énergies renouvelables sur le réseau. Cependant, des études doivent être menées pour mesurer l'impact des campagnes d'effacement sur le confort de l'occupant.

Ainsi, les premiers résultats d'une étude menée conjointement par l'ADEME et le CSTB en collaboration avec la société Voltalis montrent que l'effacement diffus pourrait permettre aux consommateurs de réaliser des économies d'électricité. Les scénarios d'effacements correspondent à des coupures de l'alimentation du chauffage et de l'eau chaude électrique pendant 15 à 20 minutes par heure. Ces coupures permettraient une économie de l'ordre de 7 à 8 % de la consommation totale journalière d'électricité les jours où l'effacement est pratiqué (Les Avis de l'ADEME 2012). De plus, les utilisateurs n'ont pas manifesté d'inconfort lors de cette étude. Cependant, ne donnant pas de détails quant à la typologie des bâtiments étudiés ni concernant les relevés de températures intérieures, il est difficile de tirer des enseignements précis. On peut en revanche retenir de cette étude la relative acceptabilité sociale d'effacements courts pour soulager le réseau électrique.

Chapitre 1 : La régulation énergétique des bâtiments

Dès lors qu'il y a une économie réalisée par l'effacement, un marché de capacité peut se mettre en place. Ainsi en France, la loi NOME (Nouvelle Organisation des Marchés de l'Électricité, loi n°2010-1488), adoptée en décembre 2010 prévoit, outre un accès régulé à l'électricité nucléaire historique et l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux, l'obligation pour les fournisseurs d'électricité à disposer de garanties de capacités d'effacement de consommation et de production d'électricité. Ces capacités d'effacement ou de production pourront alors être échangées sur un marché de capacité.

La loi BROTTE (loi n°2013-312) prévoit :

- d'une part l'organisation d'« une expérimentation permettant la valorisation des offres d'effacement de consommation d'électricité sur les marchés de l'énergie et sur le mécanisme d'ajustement, selon des modalités définies, notamment s'agissant du versement (financier) de l'opérateur d'effacement vers les fournisseurs des sites effacés » ;
- et d'autre part, « la possibilité pour un opérateur d'effacement, de procéder à des effacements de consommation, indépendamment de l'accord du fournisseur d'électricité des sites concernés et de les valoriser sur les marchés de l'énergie ou sur le mécanisme d'ajustement, ainsi qu'un régime de versement de l'opérateur d'effacement vers les fournisseurs d'électricité des sites effacés (prenant en compte les quantités d'électricité) ».

La mise en place de ce type de marché de capacité contribue au développement de nombreuses entreprises. On peut citer par exemple Voltalis, seule société à ce jour qualifiée par RTE comme acteur d'effacement résidentiel. Cette société a développé le BluePod, un boîtier qui s'installe sur le tableau électrique et permet de mesurer les consommations électriques en temps réel et de les moduler via Internet. Les appareils de chauffage ou climatisation électriques ainsi que les chauffe-eaux électriques sont concernés.

Des projets à différentes échelles ont été développés par ces opérateurs d'effacement. On peut citer par exemple la convention signée en 2010 en Bretagne (région structurellement fragile) entre le préfet, le président du Conseil régional, RTE et Voltalis et qui a pour but d'équiper du boîtier d'effacement BluePod 60 000 foyers et sites bretons volontaires. La société prend en charge les coûts d'installation du boîtier et se rémunère en vendant sa capacité d'effacement à RTE. Du point de vue industriel, il existe le projet *EnR-Pool* liant Energy Pool, Schneider Electric et le CEA par l'intermédiaire de l'INES. Ce projet a pour but d'évaluer comment les clients industriels peuvent contribuer à résoudre certaines problématiques liées à l'insertion des énergies renouvelables intermittentes sur le réseau en adaptant ponctuellement leur consommation (« Le projet *EnR-Pool* » 2013). On peut également citer le projet *Smart Electric* Lyon, démarré en 2012, qui est un démonstrateur à grande échelle regroupant des partenaires académiques et industriels. Piloté par EDF, il s'agit d'un démonstrateur où des équipementiers pourront tester leurs matériels avec des tarifs adaptés à la problématique de la pointe journalière. Les expérimentations se dérouleront dans les communes du grand Lyon et concerneront principalement des ménages propriétaires et vivant en maison individuelle.

Enfin, au niveau européen, les directives 2006/32/EC et 2009/72/EC fixent les directions de la politique énergétique européenne et supposent le déploiement de compteurs communiquant équipant

Chapitre 1 : La régulation énergétique des bâtiments

a minima 80 % des clients d'ici 2020. On peut ainsi citer en France le projet Linky, développé par ERDF. Il s'agit d'un compteur communicant qui donnera accès à la consommation électrique en temps réel et aidera à une meilleure gestion de la demande électrique et des différentes pannes. Ce compteur permettra également aux consommateurs de disposer d'offres tarifaires et de solutions de pilotage des appareils électriques dans une optique d'effacement des consommations lors des périodes de pointe électrique. Cependant, ce projet suscite de nombreuses critiques liées à la confidentialité des données, au coût d'installation et aux impacts sur la santé liés aux champs électromagnétiques.

5. CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce premier chapitre a permis de présenter les enjeux de la régulation énergétique du bâtiment, à savoir maîtriser la consommation, améliorer le confort des occupants, ou encore réduire les consommations de pointe (chauffage en hiver, climatisation en été). La réponse à ces enjeux de manière anticipative impose d'utiliser un modèle thermique du bâtiment.

Ce problème d'optimisation ainsi posé peut être résolu par des méthodes dites « en ligne » (commande prédictive) ou « hors-ligne » selon que le calcul de la stratégie énergétique optimale est réalisé en temps réel ou non.

Cet état de l'art s'est ensuite intéressé plus particulièrement à la problématique d'effacement des consommations électriques. Plusieurs équipes de recherche travaillent sur ce sujet, mais également les autorités et les entreprises qui cherchent à développer un modèle économique gagnant-gagnant pour assurer la stabilité du réseau dans des conditions acceptables pour le client final. Concernant plus spécifiquement l'effacement du chauffage électrique, quelques études ont esquissé son intérêt dans certains cas (particulièrement pour des logements bien isolés). La possibilité de sa mise en œuvre (et le gisement d'effacement associé) pour différents types de logements et pour différentes durées reste à déterminer, et notamment en termes de conséquences sur le confort des occupants.

Le prochain chapitre portera sur le développement des modèles nécessaires à la mise en place d'un système de régulation anticipatif, à savoir un modèle météorologique, un modèle d'occupation du bâtiment, et un modèle thermique dynamique du bâtiment.

