HAL
open science

Stratégies de contrôle pour la gestion énergétique d'un bâtiment

Julien Eynard, Benjamin Paris, Stéphane Grieu, Grégory François

To cite this version:

Julien Eynard, Benjamin Paris, Stéphane Grieu, Grégory François. Stratégies de contrôle pour la gestion énergétique d'un bâtiment. 3ème Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, Mar 2009, Angers, France. pp.22. hal-00504030

HAL Id: hal-00504030

https://hal.science/hal-00504030

Submitted on 19 Jul 2010

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

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

Stratégies de contrôle pour la gestion énergétique d'un bâtiment

JULIEN EYNARD[1], BENJAMIN PARIS[1], STEPHANE GRIEU[1], GREGORY FRANCOIS[1,2]

[1] Laboratoire ELIAUS (Electronique Informatique Automatique Système)
Université Perpignan Via Domitia, 52 avenue Paul Alduy, 66860 Perpignan Cedex , France

[2] Laboratoire d'Automatique, EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne), Station 9, Faculté des Sciences et Techniques de l'Ingénieur, CH-1015, Lausanne, Suisse

julien.eynard@univ-perp.fr, benjamin.paris@univ-perp.fr, grieu@univ-perp.fr, gregory.francois@univ-perp.fr

***Résumé* — La consommation des ressources énergétiques est actuellement un enjeu primordial, notamment dans le secteur du bâtiment, qui représente à lui seul 42 % de l'énergie consommée en France. La mixité énergétique, renouvelable et fossile, ainsi qu'une meilleure gestion, doivent se généraliser. Les préoccupations principales sont de réaliser des économies d'énergie et de favoriser le taux de couverture de l'énergie renouvelable, sans modifier les installations existantes. C'est pourquoi cet article propose des méthodes de commande optimale basées sur des modèles de tendance de bâtiment, ainsi que des indicateurs de performance permettant de comparer efficacement les performances des contrôleurs dans des scénarii de chauffe conventionnels. L'intérêt pour des contrôleurs de type MPC (Model-based Predictive Controller) est souligné.**

***Mots clés* — bâtiment, chauffage, régulation, optimisation, sources d'énergie hybrides, énergie renouvelable, Model-based Predictive Controller.**

I. INTRODUCTION

1. L'écosystème dans lequel nous vivons a profondément été modifié par l'activité anthropique du dernier siècle. L'un des phénomènes les plus tangibles est le changement climatique, qui s'explique notamment par les émissions mondiales de gaz à effets de serre (GES), résultant en grande partie de la consommation d'énergies fossiles.
2. Ces consommations d'énergies fossiles sont imputables à différents secteurs d'activité et en particulier au bâtiment. En effet, ce secteur comptabilise à lui seul 42 % de l'énergie globale consommée en France, soit 25 % des émissions de gaz à effet de serre [1]. Les pouvoirs publics montrent actuellement une volonté affirmée de réduction de ces consommations et d'amélioration de la gestion de l'énergie dans les bâtiments, via la Réglementation Thermique (RT 2005) [2], et les diagnostics de performances énergétiques (DPE) [3].
3. Pour améliorer la gestion énergétique des bâtiments, deux approches peuvent être envisagées : (i) optimiser structurellement les bâtiments par le choix de matériaux, d'isolants, etc., et (ii) utiliser les outils de la commande avancée pour contrôler de façon efficace l'utilisation des énergies renouvelables et fossiles. Les travaux présentés par cet article répondent à la deuxième approche. Pour contrôler le comportement énergétique d'un bâtiment, il est au préalable nécessaire de lister les grandeurs qui influencent et qui traduisent son état : commandes, sorties et perturbations, ce qui revient à modéliser un bâtiment comme un système dynamique. Après cette étude, un système d'acquisition et de traitement des données capable d'interagir avec un ensemble de capteurs a été développé, qui permet le calcul de la performance énergétique et la mise en place de lois de commande avancée. Différents types de contrôleurs FB/FF et MPC [4] sont utilisés avec cette architecture et testés objectivement sur des critères de performance énergétique. La problématique du chauffage, qui représente en France environ 70 % de l'énergie consommée, est à l'origine des travaux présentés par cet article.
4. Dans une première partie, les aspects de la performance énergétique d'un bâtiment seront exposés par le biais d'une approche systémique, par la définition de l'indicateur de performance retenu et enfin par la présentation du système électronique d'acquisition. Dans un second temps, deux modèles de tendances obtenus successivement seront présentés. Dans une troisième partie, une comparaison des contrôleurs sera faîte en termes de consommation d'énergie et de performance. Enfin, le dernier paragraphe conclura l'article.

II. PERFORMANCE ENERGETIQUE ET SYSTEME D'ACQUISITION

A. *La réglementation*

1. En France, la première réglementation concernant la thermique des bâtiments est apparue en 1975 après le premier choc pétrolier. Actuellement, la RT 2005 en vigueur codifie les différentes méthodes de calcul des performances des nouvelles constructions.
2. L'indicateur global de performance énergétique utilisé est le $kWh.m^{-2}.an^{-1}$. Le principe de base est de déterminer les différentes consommations d'énergie, les déperditions, et d'établir un bilan pour la construction à venir.
3. Cet indicateur est également utilisé dans l'existant pour le Diagnostic de Performance Energétique (DPE), c'est-à-dire pour les calculs logiciels prenant en compte : (i) les caractéristiques des matériaux, et (ii) la conception du bâti afin de classifier les bâtiments à l'image de ce qui existe dans l'électroménager.
4. L'estimation de cet indicateur global résulte de l'agrégation de consommations énergétiques provenant de sources différentes (électrique, fossile, renouvelable), et

utilisées avec des objectifs différents (chauffage, cuisine, ventilation, …). Il est donc nécessaire de définir ce qui doit être mesuré d'un point de vue énergétique pour être capable de calculer cet indicateur. Inversement, la connaissance de la valeur de l'indicateur doit permettre d'accéder à la segmentation en termes d'objectifs d'utilisation. De plus, l'acquisition de paramètres environnementaux permettra de définir l'ambiance climatique précise du bâti, la gestion énergétique en résultant n'en étant que potentiellement plus fine.

B. *Les paramètres à mesurer*

1. Pour définir l'ambiance climatique précise d'un bâtiment, plusieurs paramètres environnementaux sont nécessaires: les températures intérieures et extérieures (primordiales en raison de leur rôle dans tous les systèmes de régulation de chauffage, climatisation…), l'humidité relative…
2. Les bâtiments ont vu leur consommation énergétique croître de 30 % au cours des 30 dernières années. A l'heure actuelle, la quasi-totalité des bâtiments utilisent plusieurs sources d'énergies. La figure 2 présente la part de chaque poste de consommation dans l'habitat, la plus importante étant le chauffage.

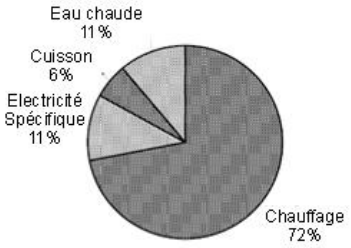

Figure 2. Usages énergétiques dans l'habitat [5].

C. *Système d'acquisition de données*

1. Le système d'acquisition se compose de 2 sous-ensembles : (i) le cœur du système (la centrale de monitoring), (ii) l'ensemble des capteurs connectés à un bus de communication. La centrale de monitoring permet de récupérer les données mesurées par les capteurs, et de les traiter pour contrôler la dépense énergétique du bâtiment. L'ensemble des capteurs installés communique les informations acquises vers le système central de monitoring et de décision. Actuellement, un réseau filaire de communication est utilisé.

III. MODELISATION D'UN BATIMENT

A. *Modélisation par approches successives*

1. La modélisation thermique d'un bâtiment est une opération assez complexe qui nécessite : (i) de nombreuses données (relevés de températures, humidités, pression)… et (ii) des paramètres définissant la structure matérielle du bâtiment considéré. Vu le nombre limité de données disponibles, un modèle de simulation basé sur plusieurs hypothèses simplificatrices a préalablement été développé ([4], [6]). Ce premier modèle a cependant permis de confirmer l'existence d'un potentiel d'optimisation pour la régulation de la température du bâtiment. Le développement du modèle a donc été poursuivi, à partir d'un ensemble de données expérimentales. Un prototype de bâtiment [7], complètement instrumenté, a été développé, afin d'obtenir une modélisation thermique plus fine et tester, à l'aide d'un système électronique embarqué, les algorithmes de régulation testés en simulation.

B. *Premier modèle théorique de simulation*

1. La pièce décrite par le premier modèle développé est un bureau de l'Université de Perpignan (10x5x3 m) d'orientation nord/sud (figure 3). L'instrumentation (intérieure et extérieure) comprend des capteurs de températures situés à proximité des parois nord/sud. D'autre part, la puissance maximale estimée pour répondre aux besoins de chauffage est d'environ 1000 W. Celle-ci est répartie de la façon suivante : 70 % pour le chauffage principal et 30 % pour l'appoint. Deux radiateurs sont placés aux extrémités du bureau, le principal de 720 W fait appel aux énergies renouvelables, le second de 365 W fonctionne aux énergies fossiles.

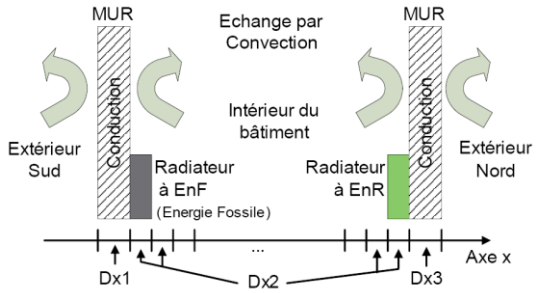

Figure 3. Discrétisation du modèle.

2. Un modèle dynamique a été développé pour représenter le comportement thermique de ce bureau (équation (1)), [4] :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \sum_{i=\{x,y,z\}} \left\{ \begin{array}{l} a_i(x,y,z)\dfrac{\partial^2 T}{\partial i^2} + \dfrac{h_i(x,y,z)}{\rho_i(x,y,z)Cp_i}\dfrac{\partial T}{\partial i} \\ + \sum_j \dfrac{a_{ij}\left(x,y,z\right)}{\lambda_{ij}(x,y,z)} P_j(x,y,z) \end{array} \right\}$$

Equation 1.

où : l'indice i définit la direction x, y ou z et l'indice j définit la j^{ème} source de chaleur ; T est la température en °C ; a ($=\lambda/\rho.Cp$) correspond au coefficient de diffusivité (m^2/s) ; λ au coefficient de conduction ($W.m^{-1}.K^{-1}$) ; ρ à la densité ($kg.m^{-3}$) ; Cp à la capacité calorifique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) ; h représente le coefficient de convection ($W.m^{-2}.K^{-1}$) et P la densité de puissance ($W.m^{-3}$).

3. Pour simplifier l'équation (1), la pièce est supposée être constituée par des matériaux homogènes et isotopiques, alors que les axes y et z sont supposés de longueurs infinies. L'équation (1) peut donc s'écrire :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{h}{\rho Cp}\frac{\partial T}{\partial x} + \sum_j \frac{1}{\rho_j Cp_j} P_j$$

Equation 2.

4. Une discrétisation spatio-temporelle par la méthode de Crank-Nicholson a été effectuée [8]. Seule la tranche de la pièce dans l'axe des radiateurs a été considérée, ce qui réduit le système à une dimension. L'influence des conditions extérieures sur les murs, par convection, est prise en compte par l'équation (3), avec ΔT représentant la différence de température entre paroi et extérieur :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\Delta T}{\partial x} \frac{h}{\rho \cdot Cp}$$

Equation 3.

Les paramètres utilisés pour le modèle sont [9]: a_{air} = 2,22.10-5 m²s^{-1}, $a_{béton}$ = 4,2.10-5 m².s^{-1}, ρ_{air} = 0,03 kg.m^{-3} et Cp_{air} = 1,006 kJ.kg^{-1}.K^{-1}.

C. *Fabrication d'un prototype de bâtiment*

1. Une habitation de 128 m^2, de plain pied, avec une baie vitrée, est à la base de la conception du prototype. L'un de ses avantages est de permettre une estimation simple du coefficient de déperditions thermiques. La conception du modèle réduit s'est déroulée en 3 étapes :
   - la mise à l'échelle physique,
   - le choix des matériaux,
   - le calcul des ressources/déperditions énergétiques.
2. La base de l'échelle est le rapport entre la taille réelle d'un dallage béton (20 cm environ) et la taille du matériau pouvant le remplacer pour la construction de la maquette. Le choix s'est porté sur un carrelage de 6 mm présentant une homogénéité semblable à celle du béton. Les épaisseurs des murs, des fenêtres, et de l'isolation sont déduites de cette échelle.
3. Le BA13 (Placoplatre) a été choisi pour les murs, le polystyrène (4 mm) pour l'isolation et le polyane (4 µm) pour les fenêtres. Ces matériaux sont des matériaux de base dans le domaine de la construction. Une isolation sous dallage a été réalisée, ainsi qu'une isolation intérieure des parois.
4. Le calcul de la puissance nécessaire pour répondre aux besoins de chauffage se déroule de la manière suivante : les conductivités thermiques des différents matériaux (W.m^{-1}.°C^{-1}) sont recherchées et associées aux épaisseurs respectives, leurs résistivités thermiques (m^2.°C.W^{-1}) sont calculées. Puis, le coefficient de déperdition $D_{bât}$ des parois (W.°C^{-1}) est évalué à partir des déperditions surfaciques des parois vitrées et opaques. Pour obtenir les déperditions totales, on y ajoute une estimation des ponts thermiques. La puissance maximale de chauffe (en Watt) est évaluée par la méthode de calcul empirique suivante :

$$P = D_{bât} \cdot \left(T_{cons} - T_{ext}\right)$$

Equation 4.

où : T_{cons} est la température de consigne et T_{ext} la température extérieure de base.
Application à la maquette : pour répondre à une température de consigne de 19 °C et à une température extérieure de base de -5 °C, la puissance de chauffe est estimée à 110 W.

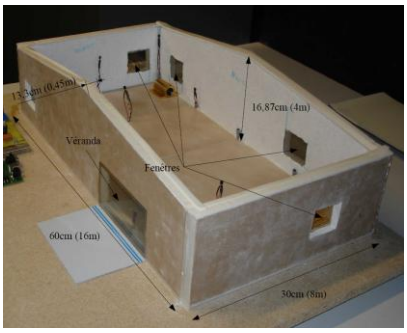

Figure 4. Le prototype du bâtiment. Les dimensions grandeur nature sont données entre parenthèses.

5. Le prototype comporte deux systèmes de chauffage, i.e. des résistances. La première, étant le système de chauffage principal (70 % de la puissance maximale) supposé alimenté par une énergie renouvelable (géothermie, biomasse, solaire…), est placée au nord ouest (endroit en théorie le plus refroidi par l'extérieur dans une habitation). Le second système de chauffage (30 % de la puissance maximale), utilisé en appoint, est quant à lui placé à l'est et est supposé fonctionner avec de l'énergie fossile (gaz, fioul, électrique - i.e. nucléaire -…).

D. *Modélisation et identification du prototype*

1. La synthèse d'algorithmes de contrôle évolués nécessite la connaissance d'un modèle mathématique du système à contrôler, c'est-à-dire un modèle thermique de notre maquette de bâtiment, qui permette de valider le comportement du régulateur en simulation avant tout essai expérimental. Le prototype a donc été modélisé à partir de mesures expérimentales, obtenues en effectuant une suite d'essais de type échelon en puissance, d'abord sur le chauffage du nord, puis sur celui de l'est. La température à l'intérieur du bâtiment est mesurée via le système d'acquisition à l'aide de capteurs de température placés au niveau du plafond (capteurs Sud Ouest et Sud Est), au niveau du sol (capteurs Nord Ouest et Nord Est) et à mi-hauteur (capteurs moitié Ouest et moitié Est). Un capteur mesure également la température sous le toit, au centre de l'habitation. Enfin, un dernier capteur mesure la température ambiante de la pièce au sein de laquelle se trouve le prototype, température considérée comme la température extérieure du système à chauffer donc comme une perturbation exogène.
2. Les deux figures suivantes montrent une partie des relevés de température obtenues lors de ces essais ainsi que la puissance de chauffe appliquée.

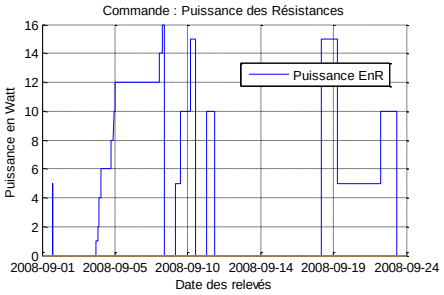

Figure 5. Puissance de chauffe appliquée.

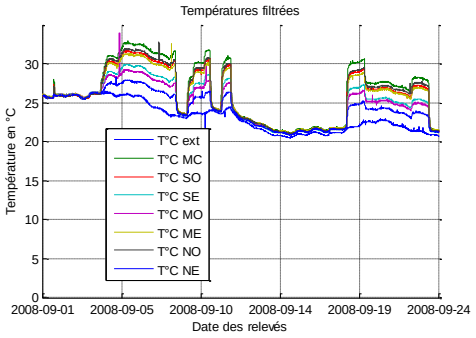

Figure 6. Températures du prototype.

3. Après un filtrage adéquat des relevés assez sensibles au bruit, on peut s'apercevoir que chacune des températures semble évoluer de façon assez similaire au niveau de sa dynamique mais avec des amplitudes différentes selon

l'emplacement. En effet, un échelon de puissance entraine immédiatement un changement brusque au niveau des températures qui au bout de quelques heures se stabilisent, sans dépassement, autour d'une valeur différente. Ce comportement est typique d'une dynamique propre du premier ordre. On peut cependant remarquer que la variation d'amplitude en régime continu n'est pas linéaire par rapport à la puissance fournie. En effet, une variation de puissance, pour des puissances de chauffe faibles, induit des variations importantes sur les températures intérieures alors que pour une même variation de puissance en haut régime, celle-ci engendre une variation plus faible sur les températures.

4. Ces quelques observations nous amènent à définir la structure du modèle thermique de notre prototype sous la forme suivante en temps discret.

$$T_i(k+1) = \alpha_i T_i(k) + \beta_{i1} u_1^{\rho_{i1}}(k) + \beta_{i2} u_2^{\rho_{i2}}(k) + \gamma_i T_{ext}(k)$$

Equation 5.

avec : T la température intérieure indicée par *i*, la position de la mesure, k l'indice du temps sous forme échantillonnée tel que $t = kT_e$ avec T_e la période d'échantillonnage (60 s), α le paramètre d'inertie propre de la température, T_{ext} la température extérieure, γ le paramètre définissant l'influence de la température extérieure, u_1 et u_2 les entrées de commande en puissance (Watt) des chauffages principaux (EnR) et d'appoint (énergie fossile), β_1 et β_2 les paramètres liant l'influence de chaque source de chaleur à la température interne, et ρ_1 et ρ_2 inférieurs à 1, modélisant la non-linéarité de l'influence décroissante du chauffage sur la température.

5. L'objectif est d'identifier pour chaque température, les paramètres α, β, γ et ρ. L'identification est basée sur une méthode itérative de minimisation de l'erreur de prédiction. Il s'agit d'un algorithme classique qui minimise pour chaque température intérieure une fonction coût *J* quadratique, définie par :

$$J = \sum_{k=1}^{N} \left(T_{mes}(k) - T_{mod}(k)\right)^2$$

Equation 6.

C'est donc l'écart entre la température mesurée T_{mes} et la température modélisée T_{mod} qui est minimisée. N représente le nombre d'échantillons de la variable à identifier. Les paramètres identifiés sont regroupés dans le tableau ci-après.

Variable modélisée	α	γ	β_1	ρ_1	β_2	ρ_2
T_{SE}	0.981	0.0193	0.0209	0.516	0.0329	0.501
T_{SO}	0.981	0.0192	0.0327	0.478	0.0188	0.540
T_{NE}	0.982	0.0179	0.00859	0.573	0.0530	0.447
T_{NO}	0.984	0.0161	0.0314	0.443	0.0107	0.467
T_{ME}	0.984	0.0160	0.0248	0.480	0.0170	0.513
T_{MO}	0.984	0.0163	0.0150	0.489	0.0267	0.460
T_{MS}	0.979	0.0209	0.0408	0.485	0.0516	0.461

Tableau 1. Paramètres identifiés pour le modèle.

6. Le *fit* exprimé en pourcentage pour chaque variable est calculé de la façon suivante :

$$fit = 100 \times \left(1 - \frac{\left\| T_{mod} - T_{mes} \right\|}{\left\| T_{mes} - < T_{mes} > \right\|}\right)$$

Equation 7.

Variable modélisée	fit en %
T_{SE}	92.22
T_{SO}	91.52
T_{NE}	88.80
T_{NO}	91.45
T_{ME}	90.69
T_{MO}	86.59
T_{MS}	91.15

Tableau 2. Fit de la modélisation.

Les résultats obtenus (tableau 2) sont très satisfaisants, en moyenne supérieurs à 90 % de ressemblance. Ce modèle pourra être efficacement utilisé pour la synthèse et la validation en simulation de correcteurs évolués pour réguler la température de la pièce.

IV. CONTRÔLE OPTIMAL

1. Différents moyens de régulation peuvent être employés pour le contrôle de la température dans une habitation. Citons par exemple la régulation manuelle qui consiste à augmenter la puissance de chauffe quand il fait froid. Il s'agit certainement de la moins économique et de la moins confortable des méthodes. Plus couramment employé, le thermostat de type TOR (Tout Ou Rien) qui s'active ou se désactive à pleine puissance quand il fait trop froid ou suffisamment chaud. Là encore ce n'est pas un modèle de confort ni d'économie même s'il reste très employé pour le chauffage de bâtiment. La troisième classe de régulateur regroupe les régulateurs en ligne qui adaptent en temps réel la puissance de chauffe, et donc sont particulièrement adaptés au suivi de consigne. Les plus connus dans cette catégorie sont les correcteurs PID. Cependant, leur fonctionnement, focalisé sur le suivi de consigne, ne leur permet pas de prendre en compte des paramètres tels que la gestion de la consommation d'énergie ni le temps qu'il fera au cours des prochaines heures. Pour cela, il est indispensable de recourir à une classe de contrôleurs plus évolués qui autorisent la prise en compte d'un objectif de minimisation de l'énergie, de la prédiction du comportement du bâtiment sur les prochaines heures, en tenant compte, par exemple, de certaines données météorologiques [10]. Pourquoi enclencher le chauffage au fioul, long à se mettre en marche, alors qu'il est prévu une hausse importante des températures extérieures dans quelques minutes ? Cette question peut résumer à elle seule la problématique de notre étude, même si nous ne traitons ici que du chauffage d'une maquette de bâtiment.
2. Le premier type de correcteur que nous avons implanté est un régulateur classique type PI auquel est ajouté un filtre Feed-forward qui prend en compte les températures extérieures pour soulager la partie Feed-back du rejet de perturbations. La puissance demandée est fournie par le système EnR (u_{EnR}). Si celui-ci est incapable de fournir

la puissance demandée, la puissance manquante est fournie par la source à énergie fossile (u_{EnF}).

3. Les correcteurs de type MPC (Model-based Predictive Controller [11]) sont des régulateurs qui utilisent (i) un modèle dynamique du processus à commander, (ii) la prédiction des entrées du système, (iii) l'optimisation d'un coût sur un horizon de contrôle *m* et un horizon de prédiction *p*. Le système de contrôle élaboré est basé sur un contrôleur PI + FF, robuste aux incertitudes, qui assure le suivi de consigne en jouant sur la puissance fournie par la source EnR, notée u_{EnR}^{PI+FF} . Un contrôleur optimal de type MPC, basé sur une prédiction des températures extérieures et de la consigne, calcule alors la puissance de complément fournie par la source EnR, notée u_{EnR}^{MPC} , et la puissance à fournir par la source d'appoint. (figure 7).

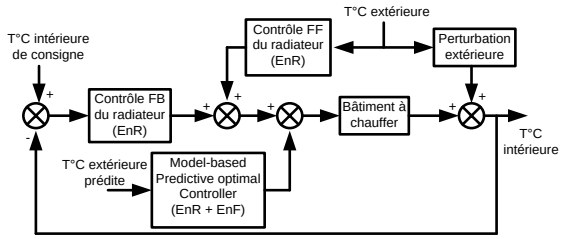

Figure 7. Schéma de contrôle mixte PI-MPC.

Le problème d'optimisation peut alors se formaliser de la façon suivante :

$$\min_{\Delta u(k/k),\cdots,\Delta u(k+m-1/k)} \sum_{i=0}^{p-1}\left(\left|\left(T_{m(k+i+1/k)} - T_{cons(k+i+1)}\right)\right|^2 + \left|\omega \cdot u_{EnF(k+i/k)}\right|^2\right)$$

$$\text{sous contrainte :} \begin{cases} \text{Equations du Modèle thermique} \\ \text{Equation du régulateur PI - FF} \\ u_{EnR\min} \le u_{EnR(k+i/k)} \le u_{EnR\max} \\ u_{EnF\min} \le u_{EnF(k+i/k)} \le u_{EnF\max} \\ \Delta u(k+h) = 0, \quad h = \{m, \ldots, p-1\} \end{cases}$$

Equation 8.

On cherche donc l'ensemble des incréments optimaux Δu_{EnR}^{MPC} et Δu_{EnF}^{MPC} qui amènent à la minimisation de la fonction objectif. Le résultat dépend de l'importance de la minimisation de l'énergie fossile par rapport au suivi de consigne, à travers le poids ω qu'il faut régler pour obtenir un comportement adéquat. Il est à noter que pour toujours obtenir un résultat d'optimisation global, nous avons du linéariser les équations de notre modèle pour rendre l'espace d'état convexe.

4. Une comparaison de ces deux classes de régulateurs a déjà été effectuée à partir du premier modèle de bâtiment [4]. Les résultats montrent un potentiel d'optimisation en termes d'économie d'énergie fossile de l'ordre de 7%. Dans la suite de cet article, le second modèle, qui correspond au prototype expérimental de bâtiment, est utilisé. Nous préciserons également plus en détails le choix du scénario de chauffe ainsi que les critères de comparaison des régulateurs.

5. Le contrôle de la température moyenne du bâtiment est basé sur les scénarii de la RT 2005 définissant, entre autre, les usages de bâtiments ainsi que leurs consignes respectives. Conventionnellement, les scénarii d'occupation, de consignes de température, de ventilation et d'éclairage artificiel sont mis en relation avec l'usage du bâtiment. Par exemple, un logement a des horaires d'occupation « longs », et un niveau de température « moyen ». Les tableaux 2 et 3 présentent les différents scénarii d'occupation et des températures de consigne conventionnelles pour le chauffage.

Horaires d'occupation	Heures par jour	Jours par semaine
Longs	16 (de 0h à 10h et de 18h à 24h)	5 (lundi au vendredi)
	24h	Samedi et dimanche
Moyens	10 (8h à 18 h)	5 (lundi au vendredi)
Courts	5 (9h à 14 h)	5 (lundi au vendredi)

Tableau 3. Scénarii d'occupation.

Niveau de température	Occupation	Réduction de chauffage de moins de 48h	Réduction de chauffage de plus de 48h
Élevé	21°C	18°C	7°C
Moyen	19°C	16°C	7°C
Réduit	15°C	7°C	7°C

Tableau 4. Températures de consigne conventionnelles pour le chauffage.

6. La comparaison de différents types de régulateurs doit se faire de manière objective avec des critères liant à la fois le suivi de consigne et la consommation d'énergie fossile. Nous considérons ici le critère de suivi de consigne comme le fit de la température moyenne intérieure, notée T_{int_moy}, par rapport à la température de consigne :

$$I_{C[\%]} = 100 \times \left(1 - \frac{\left\|T_{cons} - T_{int_moy}\right\|}{\left\|T_{cons} - < T_{cons} >\right\|}\right)$$

Equation 9.

Le critère de consommation s'appuie sur la part d'énergie fossile allouée par le régulateur.

$$I_{E[\%]} = 100 \times \frac{E_{EnF}}{E_{Tot}}$$

Equation 10.

Nous introduisons alors un critère de performance liant confort intérieur et consommation d'énergie fossile.

$$I_{P[\%]} = \left(I_C - I_E\right)$$

Equation 11.

Au mieux l'indice est égal à 100 %, ce qui indique que la température à l'intérieur est toujours égale à la consigne et que la part d'énergie fossile est nulle. Le fait que la part de l'énergie fossile ne dépasse jamais les 30%, représente un facteur de pondération indiquant que le critère de consommation est moins important que le suivi de consigne.

7. Afin de comparer efficacement les 2 types de régulation nous avons réglé les deux régulateurs à leur point de fonctionnement optimal, c'est-à-dire avec un indice de performance maximal. Pour le PI, en réglant les gains proportionnel et intégral K_I . Pour le régulateur mixte MPC-PI est ajoutée comme paramètre d'optimisation, la

pondération ω. Les paramètres optimaux sont regroupés dans le tableau 4 pour deux scénarii différents, pendant 8 jours d'hiver, bureau (moyen et moyen) et logement (long et élevé) (cf. tableaux 2 et 3). Afin de mieux représenter l'inertie d'un bâtiment réel, les scénarii ont été appliqués sur une échelle de temps de 24 heures. Ceci permet d'augmenter le rapport entre les phases transitoires et les phases stationnaires dans une proportion à l'échelle d'un bâtiment de taille réelle.

	PI-FF		Mixte MPC-PI-FF		
	K_P	K_I	K_P	K_I	ω
Bureau	100	0.09553	100	0.09553	0.050
Logement	100	0.1171	100	0.1171	0.031

Tableau 5. Paramètres optimaux de régulation

8. L'application de ces paramètres optimaux au modèle de simulation permet d'obtenir les résultats suivants pour la régulation du chauffage :

		E_{EnR} $[Wh.m^{-2}]$	E_{EnF} $[Wh.m^{-2}]$	E_{Tot} $[Wh.m^{-2}]$	$\%_{EnF}$ [%]	I_C [%]	I_P [%]
Bureau	PI	7402,5	628,29	8030,8	7,82	72,0	64,1
	MPC-PI	7339,2	381,16	7720,4	4,94	73,6	68,7
Logement	PI	7460,5	886,86	8347,3	10,6	69,8	59,2
	MPC-PI	7382,7	530,28	7913,0	6,70	71,2	64,5

Tableau 6. Critères de comparaison

9. L'analyse de ces résultats montre qu'un régulateur optimal est plus performant qu'un PI optimal au sens du critère défini précédemment, grâce à une meilleure gestion des ressources énergétiques. En effet, le MPC permet d'économiser près de 40% d'énergie fossile pour un critère de confort assez proche. La figure suivante présente les suivis de consigne assez similaire pour une température régulée par un simple PI ou par une association PI-MPC dans une configuration de bureau.

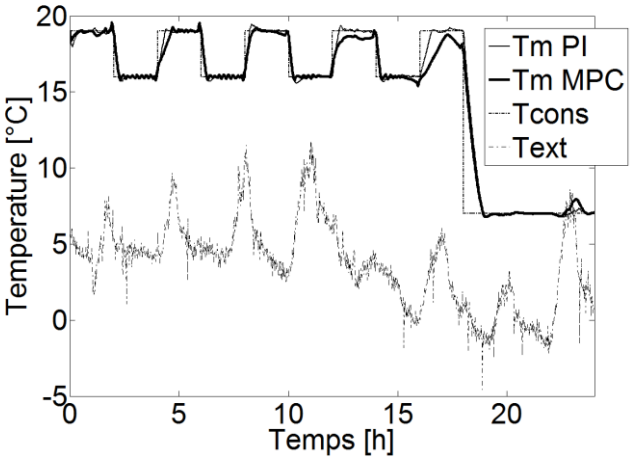

Figure 8. Suivit de consigne.

V. Conclusion

1. L'étude menée nous a permis de développer deux modèles de tendance de bâtiment afin de pouvoir tester différentes stratégies de contrôle de chauffage mixte (EnR et fossile).
2. L'utilisation de scénarii représentatifs, et la mise en place d'un indicateur de performance offre une base cohérente solide pour la comparaison de différents types de régulateurs. Les résultats montrent un gain assez net pour le régulateur prédictif. Bien sûr, une étude en simulation ne permet pas, en l'état, d'affirmer qu'il sera possible de l'implémenter sur des systèmes de contrôle électroniques conventionnels.
3. Les travaux à venir concerneront la mise en application des régulateurs développés sur le prototype de bâtiment. Ceci permettra de confirmer ou d'infirmer les résultats obtenus en simulation. Pour cela, une implantation sur un équipement électronique embarqué est nécessaire. Le principal problème rencontré concerne l'implémentation d'un algorithme d'optimisation sur une carte dont le processeur est beaucoup plus lent qu'un ordinateur de bureau. La solution passera sûrement par la synthèse d'un contrôleur hybride explicite, où l'espace d'état du modèle est découpé en différentes zones possédant chacune un régulateur régi par des équations différentielles et optimisé pour l'espace d'état considéré.

VI. References

[1] ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), « Les chiffres clés du bâtiment en 2006 », *Publications de l'ADEME*, France, 2007

[2] République française, « Décret n°2006-592 du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions », *Journal Officiel*, France, 2006.

[3] République Française, « Décret n°2006-11-47 du 14 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique et à l'état de l'installation intérieure », *Journal Officiel*, France, 2006.

[4] B. Paris, J. Eynard, G. François, T. Talbert and M. Polit, « A prototype for on-line monitoring and control of energy performance for renewable energy buildings », *ICINCO 2008, 5th International Conference on Informatics in Control, Automation & Robotics*, Funchal, Portugal, pp. 125:130, 2008.

[5] Institut français de l'environnement, http://www.ifen.fr/

[6] B. Paris, J. Eynard, G. François, T. Talbert, F. Thiéry and M. Polit, « Gestion des ressources énergétiques d'un bâtiment : contrôle neuroflou », *Conférence francophone IBPSA France 2008 (International Building Performance Simulation Association), accepté*, Lyon, France, 2008.

[7] B. Paris, J. Eynard, F. Thiéry, A. Traoré, M. Polit and T. Talbert, « Travaux pratiques sur la gestion énergétique optimale d'un bâtiment EnR », *7ème Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes CETSIS 2008, accepté*, Bruxelles, Belgique, 2008.

[8] Nougier, J.P., *Méthodes de calculs numériques*, Masson, 1993.

[9] Sacadura, J.F. « Initiation aux transferts thermiques », *Technique et Documentation*, 1993

[10] Kalagasidis, A.S., Taesler, R., Andersson C., Nord, M., « Upgraded weather forecast control of building heating systems », *Proceedings of the 3rd International Building Physics Conference*, pp. 951-958, Montreal, Canada, 2006

[11] García, C.E., Prett, D.M., Morari M., « Model predictive control: Theory and practice - A survey », *Automatica*, Vol. 25, n°3, pp. 335-348, 1989.