
Étude d'une stratégie d'effacement de la consommation électrique de pointe dans le bâtiment par l'application de la programmation dynamique

Favre Bérenger, Peuportier Bruno

Centre Energétique et Procédés, Mines-ParisTech

5 rue Léon Blum, 91120 Palaiseau France

berenger.favre@mines-paristech.fr

RÉSUMÉ. En France, 70% des bâtiments neufs sont chauffés avec des équipements électriques, entraînant des pointes de consommation hivernales très importantes. Dans cette publication, nous étudions la possibilité de décaler une partie de la consommation du chauffage en utilisant la masse thermique du bâtiment. La méthode de programmation dynamique a été utilisée pour minimiser une fonction de coût, tenant compte d'une tarification différenciée (heures creuses, pleines et pointes), sous des contraintes associées au confort (température minimale, variation de température maîtrisée) et à la puissance maximale de l'équipement. La régulation proposée surchauffe le bâtiment les heures précédant la pointe, connaissant à l'avance les conditions climatiques, l'occupation et les gains internes pour les 24 prochaines heures. Une étude de cas a été menée sur une maison individuelle, en considérant deux configurations : maison neuve performante et maison ancienne non isolée.

ABSTRACT. In France, 70% of new buildings are heated with electrical devices causing very high peak loads in winter. In this publication, we study the possibility to shift a part of electricity consumption for heating using the thermal mass of the building. Dynamic programming has been used to minimize a cost function, accounting for a high peak electricity tariff, under constraints related to comfort (minimal temperature, maximal temperature variation) and the maximum heating power. The proposed energy management consists in over-heating the building in the hours before the peak knowing in advance the weather, occupation and internal gains for the next 24 hours. The method has been tested on a case study corresponding to a single family house with two performance levels: high (new construction, and poorly insulated old house).

MOTS-CLÉS : commande optimale, programmation dynamique, bâtiment, chauffage, pointe électrique

KEY WORDS: optimal control, dynamic programming, building, heating, load shifting

1. Introduction

L'objectif principal d'une régulation énergétique d'un bâtiment est le maintien du confort thermique [MAT 00]. Dans d'autres cas c'est la minimisation de la consommation énergétique qui est recherchée [LE 08], [ESC 10] ou la réduction de la pointe de consommation électrique [SAN 08]. En période hivernale, il convient de tirer parti des apports solaires [OLD 10] et internes. Or la plupart du temps, la disponibilité de ces apports ne coïncide pas avec le moment où ils sont le plus utile. Il est donc important de pouvoir stocker ces apports, soit dans la masse du bâtiment [BRA 01], soit dans un stockage actif [HEN 04] ou dans des matériaux à changement de phase [TYA 07]. Le stockage et déstockage de la chaleur au bon moment nécessite une commande prédictive capable d'anticiper les variations de la température extérieure, des apports solaires et internes. De nombreux systèmes de commande sont présentés dans [DOU 09]. Un modèle thermique du bâtiment est nécessaire pour les régulateurs prédictifs [FRE 08], [MOR 01]. L'algorithme d'optimisation de la programmation dynamique permet de trouver une régulation prédictive optimale globale, car l'optimisation balaye l'ensemble des solutions possibles. Il a déjà été utilisé dans le cadre de la régulation thermique du bâtiment [BAU 98], [NYG 90], mais pas pour l'effacement de la consommation électrique de pointe du chauffage. Dans cette publication, une optimisation par la programmation dynamique permet de trouver une régulation prédictive optimale connaissant à l'avance le climat local et les gains internes. Cette régulation maintient le confort dans le bâtiment tout en permettant un effacement de la consommation électrique du système de chauffage en période de pointe.

2. Méthodologie

L'étude de stratégies de gestion énergétique du bâtiment nécessite un modèle thermique dynamique et un algorithme d'optimisation permettant de trouver la régulation optimale.

2.1. Modèle thermique dynamique du bâtiment

Le modèle thermique du bâtiment utilisé dans cette étude [Peu 90] est composé de zones thermiques ayant une température homogène. A l'intérieur de chacune de ces zones, les murs sont divisés en mailles, chacune de ces mailles ayant également une température homogène. Une maille supplémentaire est ajoutée pour l'air et le mobilier présents dans la zone. Sur chacune des mailles, un bilan thermique est effectué :

$$C_{maille} \frac{dT_{maille}}{dt} = Gains - Pertes \quad (1)$$

C_{maille} étant la capacité thermique de la maille, T_{maille} sa température et $Gains$ et $Pertes$ comprenant les transferts thermiques par conduction, convection et rayonnement mais également les apports solaires et internes ainsi que les puissances de chauffage ou de refroidissement des équipements.

Ce bilan thermique est répété pour chaque maille de chaque zone, en ajoutant une équation de sortie, on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} C\dot{T}(t) = AT(t) + EU(t) \\ Y(t) = JT(t) + GU(t) \end{cases} \quad (2)$$

avec

- T le vecteur des températures de mailles
- U le vecteur des sollicitations (données climatiques, chauffage, etc.)
- Y le vecteur des sorties (la température opérative des zones prenant en compte l'air et les surfaces des murs)
- C la matrice diagonale des capacités thermiques
- A, E, J, G les matrices reliant les températures aux sollicitations

Un modèle thermique dynamique détaillé est ainsi constitué. Afin d'effectuer des optimisations rapides, ce modèle est réduit par analyse modale. La résolution de ce système nécessite de connaître les sollicitations, en particulier l'émission de chaleur par les habitants et les équipements (électroménager, bureautique...) mais également les données météorologiques locales concernant la température extérieure et le rayonnement solaire.

2.2. Algorithme d'optimisation

La programmation dynamique est un algorithme d'optimisation séquentiel permettant d'obtenir l'optimum global en balayant l'ensemble des solutions possibles compte tenu d'une discrétisation. Dans le cas présent, il s'agit de déterminer un ensemble de commandes (marche ou arrêt du chauffage) permettant de minimiser la fonction de coût sur la période considérée, en tenant compte des contraintes en termes de confort et de commande (puissance maximale de l'équipement de chauffage).

On note u la variable de contrôle comprenant N_c dimensions :

$$u(t) = u_t \in U_t, U_t \subset R^{N_c} \quad (3)$$

avec U_t l'ensemble des commandes possibles. L'équation d'état à chaque pas de temps t est alors :

$$x(t) = x_t, x(t+1) = f(x(t), u(t), t) \quad (4)$$

x étant la variable d'état discrétisée temporellement :

$$x(t) = x_t \in X_t, X_t \subset R^{N_e} \quad (5)$$

avec X_t l'ensemble des états possibles, N_e la dimension de X_t .

Une fonction valeur v_t correspondant au coût de passage de $x(t)$ à $x(t+1)$ est définie :

$$v_t(x_t, x_{t+1}), x_{t+1} \in \Gamma_t(x_t) \quad (6)$$

Γ_t étant l'ensemble des états possibles à t . La fonction coût est alors la somme des fonctions valeurs sur tous les pas de temps :

$$V_0^t = \sum_{j=0}^{t-1} v_j(x_j, x_{j+1}) \quad (7)$$

L'optimisation cherche à maximiser ou minimiser la fonction objectif suivante sur N pas de temps :

$$J = \text{Max}[V_N] \quad (8)$$

Cette équation donne l'ensemble de commandes pour aller de x_0 à x_t . Les temps d'optimisation pouvant être très longs, le principe d'optimalité de Bellman est appliqué:

« Une politique optimale a la propriété que quelque soient son état initial et sa décision initiale, les décisions restantes doivent constituer une politique optimale suivant l'état résultant de la première décision » [BEL 57].

L'équation (8) devient alors :

$$J = \text{Max}[V_0^{N-1}] = \text{Max}(v_0(x_0, x_1)) + \text{Max}(V_1^{N-1}) \quad (9)$$

En résumé, il faut trouver l'ensemble des commandes $U_n = (u_0, u_1, \dots, u_N)$ minimisant (9) à partir d'un système décrit en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** avec des contraintes sur la variable d'état (5) et la commande **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

3. Présentation du cas d'étude

3.1. Description des bâtiments étudiés

Le premier cas d'étude s'inspire d'une maison expérimentale située au Bourget du Lac faisant partie de la plateforme INCAS. La maison a deux étages pour une surface habitable totale de 89 m². 34% de sa façade sud est vitrée alors que la façade nord a deux petites fenêtres. Toutes les fenêtres sont à double vitrage sauf celles en façade nord qui ont un triple vitrage. La façade sud est également équipée de protections solaires. Les murs extérieurs sont constitués par deux parois de blocs de béton de 15 cm de part et d'autre de 15 cm de laine de verre et le plancher de 20 cm de béton renforcé. L'isolation est composée de 30 cm de laine de verre dans les combles et 20 cm de polystyrène sous le plancher bas. Une ventilation mécanique contrôlée (VMC) double flux permet de récupérer une partie de l'énergie de l'air

vicié grâce à un échangeur. La maison de la plate forme INCAS correspond environ au standard maison passive. Nous considérons ici un niveau BBC, moins performant en termes d'étanchéité à l'air. Une efficacité globale de 0.6 est alors considérée pour tenir compte des infiltrations. Selon les résultats de la simulation thermique dynamique effectuée avec Pléiades+COMFIE, les besoins de chauffage annuels sont dans ce cas de 24kWh/m².

Le deuxième cas d'étude est le même bâtiment mais beaucoup moins isolé. Toute l'isolation a été supprimée à l'exception de 10cm de laine de verre dans les combles. Toutes les fenêtres sont simple vitrage et la VMC est sans récupération de chaleur. Les besoins de chauffage annuels de cette maison sont de 279 kWh/m².

3.2. Paramètres d'optimisation

La variable d'état choisie pour la programmation dynamique est l'énergie totale E stockée dans le bâtiment, elle est calculée de la manière suivante :

$$E = \sum_{i=1}^{nbr_mailles} E_i = \sum_{i=1}^{nbr_mailles} C_i T_i \quad (10)$$

avec C_i la capacité thermique de la maille i et T_i la température de cette maille. Le modèle thermique du bâtiment est mono-zone, il y a donc une seule commande de chauffage et une seule température intérieure pour l'ensemble du bâtiment. Pour garantir le confort thermique dans le bâtiment, la température intérieure ne doit pas passer en dessous de 19°C, ni varier de plus de 2.2°C/h [ASH 03]. Le prix du kWh d'électricité dépend de l'heure de la journée, trois périodes sont considérées :

	Heures creuses	Heures pleines	Heures de pointe
Horaire	1H – 8H	9H – 16H 22H – 24H	17H – 21H
Prix du kWh en €	0.0864	0.1275	0.255

Tableau 1 : Tarifs des heures creuses, pleines et de pointe.

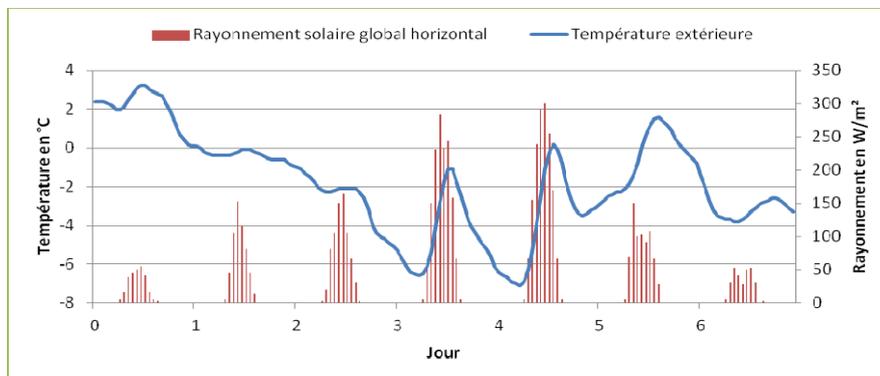


Figure 1 : Climat local de la semaine de simulation

L'optimisation est réalisée sur 7 jours avec une météo froide qui correspond aux périodes où la pointe de consommation électrique est la plus pénalisante (Figure 1). La simulation prend en compte deux semaines d'initialisation. L'occupation du bâtiment est typique pour une famille de 4 personnes : le bâtiment est occupé de 17h à 8h sauf le weekend end où il est occupé en continu. Chaque occupant émet 80W par son métabolisme, il y a également des apports internes des équipements durant les périodes d'occupation.

4. Résultats

Une optimisation par la programmation dynamique est réalisée sur chacun des cas d'étude. Les régulations résultantes sont comparées en termes de confort et d'effacement de la consommation de chauffage pendant la période de pointe. Ils sont également comparés à une régulation « classique » assurant 19°C en continu.

4.1. Effacement de la consommation de pointe dans une maison basse consommation

Le premier cas d'étude s'intéresse à la maison basse consommation. L'optimisation par la programmation dynamique est réalisée avec la fonction valeur suivante (6) :

$$v_t(E_t, E_{t+1}) = P_{chauff} * C(t) \quad (11)$$

avec P_{chauff} la puissance de chauffage ne pouvant dépasser 5 000 W et $C(t)$ le coût d'utilisation de l'électricité en kWh entre t et $t+1$ (Tableau 1). Cette fonction valeur doit permettre non seulement d'éliminer la consommation d'électricité en période de pointe mais également de prendre en compte le différentiel de coût entre les heures creuses et les heures pleines. Les résultats sont présentés dans la Figure 2.

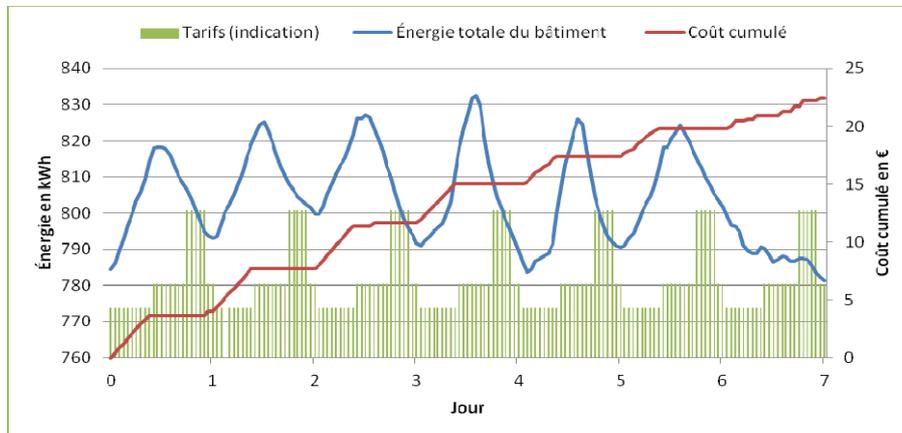


Figure 2 : Évolution de l'énergie et du coût cumulé pour la politique optimale dans la maison basse consommation

La variable d'état de la programmation dynamique, l'énergie totale stockée dans le bâtiment, évolue de façon cyclique, elle est en effet fortement influencée par le climat local. Le coût cumulé n'augmente pas pendant les périodes de pointe des 6 premiers jours de la semaine : la consommation de chauffage a été effacée pendant les 5 heures de pointe journalières. Par contre, le chauffage a fonctionné durant une heure en pointe le dernier jour. Il sera alors utile de mener l'optimisation sur une période glissante, prenant en compte au moins un jour suivant. Le coût cumulé n'augmente pas non plus pendant tout ou partie des heures pleines suivant la journée. La régulation optimale chauffe le bâtiment principalement pendant les heures creuses, et peut effacer jusqu'à 15 h d'affilée la consommation de chauffage.

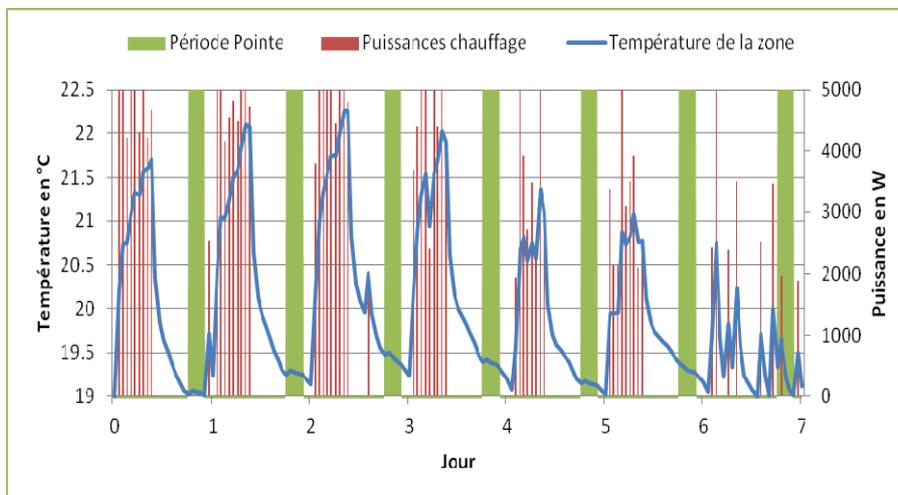


Figure 3 : *Température intérieure et puissance de chauffage pour la politique optimale sur la maison basse consommation*

Pendant les sept jours étudiés, la température ne passe jamais en dessous de 19°C (Figure 3). Elle évolue à son maximum à 1.4°C par heure, les augmentations et diminutions de la température pour effacer les heures de pointe ne dégradent donc pas le confort thermique. La Figure 3 confirme que le chauffage n'est utilisé qu'une seule heure le dernier jour pendant la période de pointe. Cette régulation issue de l'optimisation par la programmation dynamique est maintenant comparée à une régulation classique en termes économique et énergétique.

4.2. Comparaison à une régulation classique

Une régulation classique consiste à calculer la puissance de chauffage nécessaire à chaque pas de temps pour maintenir une température de 19°C à l'intérieur du bâtiment. Celle-ci n'efface donc pas la pointe de consommation électrique. La première comparaison possible est d'ordre tarifaire. Sur l'ensemble de la semaine étudiée, la régulation optimale obtenue par la programmation dynamique permet de chauffer la maison pour un coût de 22.5€ contre 27.3€ pour la régulation classique. La régulation optimale permet de réaliser 18% d'économie tout en effaçant la pointe de consommation électrique. Par contre, la consommation d'énergie augmente de 16% car il faut surchauffer le bâtiment une partie du temps, ce qui accroît les déperditions.

4.3. Effacement de la consommation de pointe dans une maison peu isolée

L'objectif est de voir s'il est également possible d'effacer la consommation de chauffage en période de pointe sur une maison peu isolée. La puissance maximale

de chauffage a été augmentée à 20 000 W pour permettre de chauffer le bâtiment convenablement. Les résultats sont présentés dans la figure suivante :

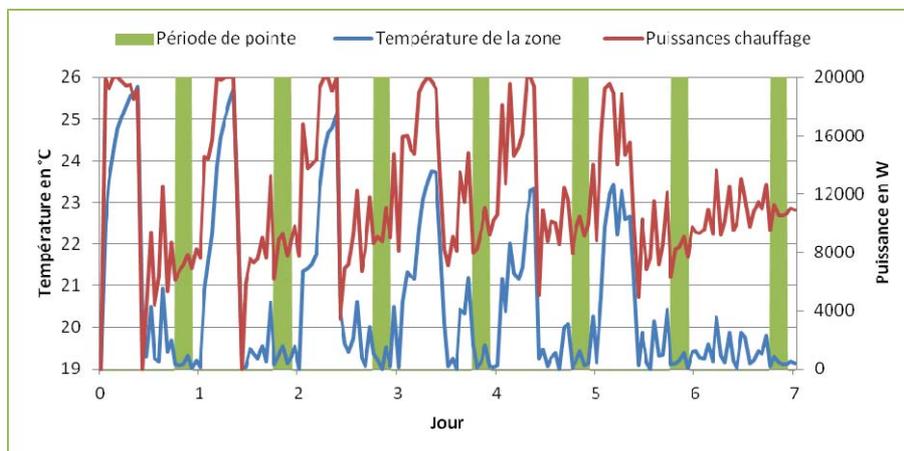


Figure 4 : Évolution de la température intérieure et du coût cumulé pour la politique optimale dans la maison peu isolée

Durant les sept jours étudiés, la puissance de chauffage n'est jamais complètement effacée pendant les périodes de pointe. Elle a une valeur plus réduite que le reste du temps mais l'effacement complet n'est pas atteint. Les puissances de chauffage utilisées pour chauffer le bâtiment et stocker de l'énergie dans sa masse thermique sont très importantes, entraînant une augmentation rapide de la température intérieure. Celle-ci varie entre 19°C et 26°C pendant les périodes d'heures creuses de 1h à 8h du matin. Ces périodes ne sont pas propices à une adaptation de l'occupant à une forte évolution de la température, qui est donc inconfortable. De plus, quand le chauffage est coupé pour limiter la consommation d'électricité pendant les heures pleines, la température chute brutalement de plus de 2.2°C par heure pendant 7h au total durant la semaine. Cette politique optimale est également comparée à une régulation classique maintenant la température intérieure à 19°C. L'augmentation de la consommation énergétique est cette fois de 15%, alors que la consommation électrique de pointe n'est pas complètement effacée. L'énergie stockée dans la masse thermique du bâtiment est en grande partie perdue par manque d'isolation.

5. Conclusion

Une optimisation par la programmation dynamique a permis d'étudier une stratégie de gestion énergétique optimale d'un bâtiment. Le chauffage a été commandé pour permettre l'effacement de sa consommation électrique pendant la période de pointe allant de 17h à 21h tout en maintenant le confort à l'intérieur du bâtiment. Un cas d'étude sur un bâtiment basse consommation et un autre sur un

bâtiment peu isolé ont montré que l'effacement de la pointe n'est possible que sur les maisons très bien isolées. Une prochaine étude portera sur une régulation multi-objectifs (coût et consommation énergétique) grâce à un front de Pareto. Il sera aussi intéressant d'étudier l'influence de l'inertie thermique du bâtiment sur l'effacement de la consommation électrique du chauffage pendant la période de pointe. Enfin, une régulation des protections solaires et de la ventilation sera étudiée pour le maintien du confort thermique dans le bâtiment en période de canicule.

Remerciements :

Ce travail a été supporté par la Chaire ParisTech-VINCI « Éco-conception des Ensembles Bâtit et des Infrastructures » et par le projet ANR SIMINTHEC.

Bibliographie :

- [ASH 03] ASHRAE, « Thermal Environmental Conditions for human Occupancy », *ASHRAE Standard*, 2003.
- [BAU 98] BAUER M., Gestion Biomimétique de l'énergie dans le bâtiment, Thèse de doctorat, École Polytechnique de Lausanne, 1998.
- [BEL 57] BELLMAN R., *Dynamic Programming*, Princeton University Press, 1957.
- [BRA 01] BRAUN J.E., MONTGOMERY K.W., CHATURVEDI N., « Evaluating the Performance of Building Thermal Mass Control Strategies », *HVAC&R Research*, vol. 7, n°4, 2001, p. 403- 428.
- [DOU 09] DOUNIS A.I., CARAISCOS C., « Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment – A review », *Renewable and sustainable Energy Reviews*, vol. 13, 2009, p.1246-1261.
- [ESC 10] ESCRIVA-ESCRIVA G., SEGURA-HERAS I., ALCAZAR-ORTEGA M., « Application of an energy management and control system to assess the potential of different control strategies in HVAC systems », *Energy and Buildings*, vol. 42, 2010, p. 2258-2257.
- [FRE 08] FREIRE R.Z., OLIVEIRA G.H.C., MENDES N., “Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings”, *Energy and Buildings*, vol. 40, 2008, p. 1353-1365.
- [HEN 04] HENZE, G.P., FELSMANN, C., KNABE, G., « Evaluation of optimal control active and passive building thermal storage ». *International Journal of Thermal Sciences*. vol. 43, 2004, p. 173-183.
- [LE 08] LE K., Gestion optimale des consommations d'énergie dans les bâtiments, Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, Université de Danang, 2008.

- [MAT 00] MATTHEWS E.H., ARNDT D.C., PIANI C.B., VAN HEERDEN E., « Developing cost efficient control strategies to ensure optimal energy use and sufficient indoor comfort », *Applied Energy*, vol. 66, 2000, p. 135-159.
- [MOR 01] MOREL N., BAUER M., EL-KHOURY M., KRAUSS M., "Neurobat : a predictive and adaptive heating control system using artificial networks", *International Journal of Solar Energy*. vol. 21, 2001, p. 161-201.
- [NYG 90] NYGARD FERGUSON A.M., Predictive thermal control of building systems, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1990.
- [OLD 10] OLDEWURTEL F et al., « Energy efficient building climate control using Stochastic Model Predictive Control and weather predictions », *American Control Conference*, Baltimore USA, 30 Juin - 2 Juillet, 2010.
- [Peu 90] PEUPOORTIER B., SOMMEREUX I.B., « Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings », *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 8, 1990, p 109-120.
- [SAN 08] SANE H., GUAY M., « Minmax Dynamic Optimization over a Finite-time Horizon for Building Demand Control », *American Control Conference*, Seattle USA, 11-13 Juin, 2008.
- [TYA 07] TYAGI, V.V., BUDDHI, D., « PCM thermal storage in buildings : A State of art. » *Renewable and sustainable Energy Reviews*. vol. 11, 2007, p. 1146-1166.