



## **Gestion des ressources énergétiques d'un bâtiment : contrôle flou**

Benjamin Paris, Julien Eynard, Grégory François, Thierry Talbert, Adama Traore, Frédéric Thiéry

### **► To cite this version:**

Benjamin Paris, Julien Eynard, Grégory François, Thierry Talbert, Adama Traore, et al.. Gestion des ressources énergétiques d'un bâtiment : contrôle flou. Conférence IBPSA France 2008, Nov 2008, Lyon, France. pp.NA, 2008. <hal-00503965>

**HAL Id: hal-00503965**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00503965>**

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.

# Gestion des ressources énergétiques d'un bâtiment : contrôle flou

**B. Paris, J. Eynard, G. François, T. Talbert, A. Traore, F. Thiéry**

*Laboratoire Eliaus-Université de Perpignan Via Domitia*

*52, Avenue Paul Alduy, 66860 Perpignan Cedex*

*{Benjamin.paris, julien.eynard, gregory.françois, traore, talbert, thiery}@univ-perp.fr*

---

*RESUME. La gestion énergétique des bâtiments représente un enjeu majeur en raison des fortes consommations rencontrées. La législation en vigueur, à l'aide d'un indicateur global (kWh/m<sup>2</sup>/an), vise à réduire ces consommations d'énergie par le biais des réglementations thermiques successives. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est de développer des outils capables d'améliorer cette gestion, et de favoriser l'emploi des énergies renouvelables. En premier lieu, le bâtiment est représenté comme un système dynamique. Puis un système d'acquisition de données permet la mesure de variables environnementales et énergétiques, afin de décrire le fonctionnement d'un bâti dans un environnement donné. Ces mesures alimenteront un contrôleur à base de logique floue pour le contrôle de température dans des bureaux de l'université, dans le but déterminer par simulation la consommation énergétique.*

*MOTS-CLÉS : bâtiment, performance énergétique, contrôleur flou*

---

*ABSTRACT. The improvement of the energetic behavior of buildings has turned into a major issue due to the high level of energy consumption. One of the main objectives of the current French legislation, thanks to the definition of a global performance indicator (expressed in kWh/m<sup>2</sup>/yr), is to reduce the total energy consumption in buildings. In this context, the goal of this work is to develop tools for reducing the use of fossil energy while improving the use of renewable energies. First, the building is represented as a dynamical system and a data acquisition system is developed, which allows the measurement of environmental and energetic parameters, so as to describe the behavior of the building interacting with its direct environment. These measurements will be used by a fuzzy controller whose ability to control and optimize the energetic consumption will be illustrated through the simulation of the temperature control in University's offices.*

*KEYWORDS: buildings, energetic performance, fuzzy logics.*

---

## **1. INTRODUCTION**

L'activité anthropique du dernier siècle a profondément modifié l'écosystème dans lequel nous vivons : le changement climatique en est un des principaux phénomènes. Ce dernier s'explique en particulier par les émissions mondiales de gaz à effets de serre (GES), résultant majoritairement de la consommation d'énergies fossiles.

Plus précisément, ces consommations d'énergies fossiles sont imputables aux différents secteurs d'activité dont le bâtiment fait partie. Il représente à lui seul 42% de l'énergie globale consommée en France (40% au niveau européen), soit 25% des émissions de gaz à effet de serre (Ademe, 2007). Les pouvoirs publics montrent actuellement une forte volonté de réduire ces consommations et d'améliorer la gestion de l'énergie dans les bâtiments, notamment par le biais de la Réglementation Thermique (RT 2005) (Journal Officiel, 2006, CSTB, 2006) et des diagnostics de performances énergétiques (DPE).

Pour améliorer la gestion énergétique des bâtiments deux approches peuvent être utilisées : (i) optimiser structurellement les bâtiments par le choix de matériaux, d'isolants, ..., et (ii) utiliser les outils de la commande avancée pour contrôler de façon efficace l'utilisation des énergies renouvelables et fossiles. C'est dans cette deuxième approche que se situent les travaux présentés dans cet article. Pour contrôler le comportement énergétique d'un bâtiment, il est au préalable nécessaire de lister les grandeurs qui influencent son état : commandes, sorties et perturbations. Ceci revient à représenter un bâtiment comme un système dynamique. Cette étude faite, on doit choisir les capteurs utiles et élaborer un système d'acquisition et de traitement des données qui soit capable d'interagir avec les capteurs, de permettre le calcul de la performance énergétique, et de mettre en place des lois de commande avancée. Un tel prototype a été développé au laboratoire, et la loi de contrôle que nous proposons d'utiliser avec cette architecture sera élaborée à base de logique floue. D'autres lois de contrôle ont été testées en simulation (FB/FF, MPC, Paris *et al.*, 2008), le choix du contrôleur flou dans cette étude se justifiant par sa facilité d'implantation et par le fait qu'il soit relativement peu gourmand en ressources. Nous nous concentrons sur la problématique du chauffage qui représente en France environ 70% de l'énergie consommée.

Dans une première partie, nous exposerons les aspects de la performance énergétique d'un bâtiment par le biais d'une approche systémique, par la définition de l'indicateur de performance retenu et par la présentation du système électronique d'acquisition. Puis, dans un second temps, le modèle de tendances d'un bureau sera présenté, pour lequel un contrôleur flou sera dimensionné dans le paragraphe 4. Les résultats de simulation seront présentés dans le 5<sup>ème</sup>, et le paragraphe 6 conclura le papier.

## 2. PERFORMANCE ENERGETIQUE DES BATIMENTS

### 2.1. INDICATEUR

Actuellement, la RT2005 et le DPE utilisent un indicateur de performance énergétique dont l'unité est le kWh/m<sup>2</sup>/an. Il s'agit d'un indicateur global, regroupant les consommations d'énergies des différents postes, comme le chauffage, la climatisation ou encore l'eau chaude sanitaire. Pour être précis et travailler efficacement sur la gestion énergétique d'un bâtiment particulier, il nous faut être capable de segmenter ces consommations, et de les corrélérer à une ambiance climatique caractéristique d'un site.

### 2.2. APPROCHE SYSTEMIQUE

Afin de mieux comprendre le fonctionnement d'un bâtiment, nous pouvons aisément le définir comme un système (figure 1), ayant de multiples entrées et sorties.

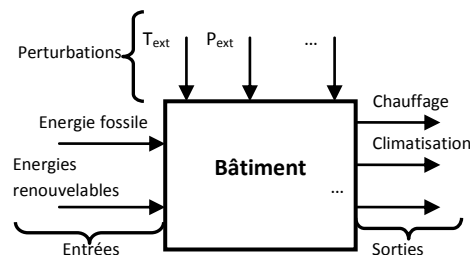


Figure 1 : Représentation systémique d'un bâtiment.

D'un point de vue énergétique, nous considérons que les entrées correspondent aux ressources énergétiques disponibles, et les sorties aux différentes consommations. Les perturbations sont des entrées non manipulables influençant l'état du système, à savoir, sa consommation énergétique.

### 2.3. METROLOGIE ET ELECTRONIQUE EMBARQUEE

Pour répondre à nos besoins, nous avons mis au point un système d'électronique embarquée. Ce système comprend des modules de capteurs connectés à un cœur (Arm9), capable d'enregistrer et de traiter les données. Il permet de mesurer les perturbations de notre système (températures, humidité, pression, ensoleillement...), ainsi que les entrées (énergies disponibles), tout en commandant le système en temps réel, dont les sorties sont par exemple les niveaux de consommation d'électricité spécifique, du chauffage...

## 3. MODELE DE TENDANCES D'UN BUREAU UNIVERSITAIRE

La pièce modélisée correspond à un bureau de l'Université de Perpignan (10x5x3m) d'orientation nord / sud (figure 2). L'instrumentation (intérieure et extérieure) pour ce modèle, comprend des capteurs de températures proches des parois nord / sud. De plus, la puissance maximale estimée pour répondre aux besoins de chauffage est d'environ 1000 W. Celle-ci est partagée classiquement en 70% pour le chauffage principal et 30% pour l'appoint. Nous définissons donc deux radiateurs aux extrémités du bureau, le principal de 720W faisant appel aux énergies renouvelables, l'autre de 365 W fonctionnant aux énergies fossiles.

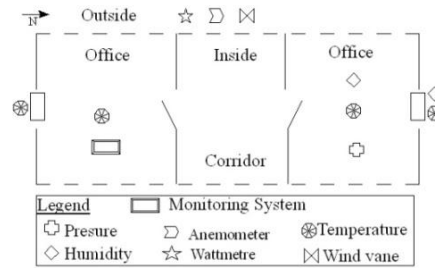


Figure 2 : Bureau de l'université.

Un modèle dynamique a été développé pour représenter le comportement thermique de ce bureau (équation (1)), (Paris *et al.*, 2008) :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \sum_{i=\{x,y,z\}} \left\{ a_i(x,y,z) \frac{\partial^2 T}{\partial i^2} + \frac{h_i(x,y,z)}{\rho_i(x,y,z)Cp_i} \frac{\partial T}{\partial i} + \sum_j \frac{a_{ij}(x,y,z)}{\lambda_{ij}(x,y,z)} P_j(x,y,z) \right\} \quad [1]$$

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

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{h}{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial x} + \sum_j \frac{a_{xj}}{\rho_j C_{pj}} P_j \quad [2]$$

Une discrétisation spatio-temporelle par la méthode de Crank-Nicholson a été choisie en raison d'une stabilité accrue en simulation, ainsi qu'une réduction de l'erreur de troncature (Nougier, 1993). Il a été considéré uniquement la tranche de la pièce dans l'axe des radiateurs, 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  $\Delta T$  représentant la différence de température entre celle de la paroi et l'extérieure :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\Delta T}{\partial x} \frac{h}{\rho C_p} \quad [3]$$

Les paramètres utilisés pour le modèle sont (Sacadura, 1993) :  $a_{\text{air}} : 2,22 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $a_{\text{béton}} : 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\rho_{\text{air}} : 0,03 \text{ kg}/\text{m}^3$  et  $C_{\text{pair}} : 1,006 \text{ kJ}/\text{kg.K}$ .

#### 4. DESIGN D'UN CONTROLEUR FLOU ADAPTE AU SYSTEME ETUDIE

##### 4.1. ASPECTS THEORIQUES

Le raisonnement flou s'appuie sur le concept des sous-ensembles flous, par opposition à la logique binaire. Cela permet de prendre en compte et de manipuler des informations de nature imprécise, des classes aux frontières vagues pouvant se chevaucher, ou encore la notion de multi appartenance d'un élément à plusieurs catégories avec un certain degré. Outre l'ensemble de ces concepts fondamentaux, le raisonnement flou concilie, de manière cohérente, des données symboliques ou qualitatives (connaissances humaines) avec des données numériques (Zadeh, 1976, Zadeh, 1978). La capacité de la théorie à pouvoir intégrer le savoir faire humain dans le raisonnement et l'apparition de logiciels puissants spécialisés dans le traitement des systèmes d'inférences flous ont permis son ouverture à un champ d'applications quasi illimité à travers le monde. On peut noter entre autres, les secteurs de l'énergie (régulateurs de température, systèmes de climatisation), les transports (automobiles, métros, aviation), les industries (papeterie, cimenterie, sidérurgie), la médecine, les biotechnologies ou encore la robotique.

L'architecture généralement utilisée pour la résolution des problèmes par logique floue est composée de trois parties selon la figure 4 (Traore, 2003):

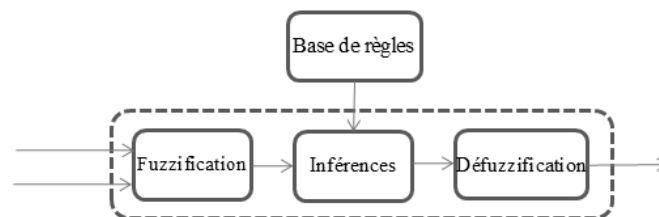


Figure 4 : Structure générale d'un système d'inférences floues.

##### 4.2. FUZZIFICATION

La fuzzification consiste à définir les fonctions d'appartenance des différentes variables d'entrée et de sortie. On réalise ainsi le passage des grandeurs physiques (grandeurs déterminées) aux variables linguistiques (variables floues), qui peuvent alors être traitées par des inférences.

Les variables d'entrée pour le contrôleur flou sont l'écart entre la température de consigne  $T_c$  et la température intérieure moyenne  $T_{\text{moy}}$  du système et la dérivée de cet écart.

- L'écart peut donc s'écrire sous la forme :  $\varepsilon(t) = T_c + T_{\text{moy}}$ .
- La dérivée de l'écart s'écrit :  $\Delta\varepsilon(t) = \varepsilon(t) - \varepsilon(t - 1)$ .

Ces deux variables d'entrée sont chacune décrites par 3 sous ensembles flous dont les fonctions d'appartenance sont de type gaussienne et les variables linguistiques associées sont : Négatif (N), Nul (Nul), Positif (P). Le nombre de sous ensembles flous par variables, de même que le nombre de variables, peut varier selon la sensibilité désirée. Il a été montré que l'emploi d'une seule variable n'est pas suffisant pour de tel système (Guanrong *et al.*, 2001, Lygouras *et al.*, 2007). Par exemple si l'écart est positif, la prise en compte de sa dérivée permet de déterminer si cet écart est croissant ou décroissant. Ce qui permet d'envisager la commande correspondante.

La variable de sortie, correspondant à la puissance totale de chauffage nécessaire, est quand à elle définie par 5 sous ensembles flous de type triangulaire et dont les variables linguistiques sont : Négatif Grand (NG), Négatif Petit (NP), Nul (Nul), Positif Petit (PP) et Positif Grand (PG).

#### 4.3. MOTEUR D'INFERENCE FLOUE

Les règles floues utilisées sont généralement de deux types: MISO (Multiple Input, Single Output) ou MIMO (Multiple Input, Multiple Output). En considérant un système de type MISO, soit  $x = \{x_1, \dots, x_r\}$  les variables d'entrée du système appartenant aux ensembles de référence  $X = X_1 \times \dots \times X_r$  et  $y$ , la variable de sortie appartenant à l'espace  $Y$ . La structure de Mamdani, généralement utilisée, est exprimée sous la forme d'une série de règles du type :

$$r_i : SI (x_1 \text{ est } B_{i1}) \dots \text{ et } \dots (x_r \text{ est } B_{ir}) \text{ ALORS } (y \text{ est } D_i)$$

où  $B_{i1}, \dots, B_{ir}$  et  $D_i$  sont des valeurs linguistiques de  $x_1, \dots, x_r$  et  $y$  respectivement. En notant  $B_i = B_{i1} \times \dots \times B_{ir}$ , on peut réécrire l'équation précédente sous la forme :

$$r_i : SI x \text{ est } B_i \text{ ALORS } y \text{ est } D_i$$

L'ensemble des 9 règles définies pour le contrôle de la température moyenne de la pièce sont résumées dans le tableau suivant :

| Chauffage           |     | $\varepsilon$ |     |    |
|---------------------|-----|---------------|-----|----|
|                     |     | N             | Nul | P  |
| $\Delta\varepsilon$ | N   | NG            | NP  | PP |
|                     | Nul | NP            | Nul | PP |
|                     | P   | NP            | PP  | PG |

Tableau 1 : Définitions des règles.

A titre d'exemple, nous pouvons écrire une des 9 règles qui correspond à :

$$R_i : \text{Si } \varepsilon \text{ est } Nul (Nul) \text{ ET } \Delta\varepsilon \text{ est } Positif (P) \text{ ALORS } \text{Chauffage est } Positif \text{ Petit } (PP).$$

Notons que nous avons utilisé la méthode d'inférence max-min. Cette méthode réalise, au niveau de la condition de chaque règle, l'opérateur OU par le calcul du maximum et l'opérateur ET par le calcul du minimum. Pour la conclusion de chaque règle, l'implication, permettant d'obtenir la fonction d'appartenance partielle, se fait par l'opérateur ET (réalisé par formation du minimum). Enfin, au niveau de l'agrégation des règles, l'opérateur OU qui lie les différentes règles est réalisé par le calcul du maximum.

#### 4.4. DEFUZZIFICATION

Les méthodes d'inférence fournissent en sortie une fonction d'appartenance résultante  $\mu_{RES}$  pour la variable  $y$  définie sur un univers de discours  $[a, b]$ . Il s'agit donc d'informations floues. Comme nous l'avons souligné pour le bloc de fuzzification, ici il faut envisager l'opération inverse permettant de transformer ces grandeurs floues en grandeurs numériques pour les transmettre au système extérieur. Il existe plusieurs techniques de défuzzification mais la plus utilisée est la méthode par centre de gravité. Il s'agit de déterminer le centre de gravité  $y^*$  de la fonction d'appartenance  $\mu_{RES}(y)$  (équation 4):

$$y^* = \frac{\int_a^b y \cdot \mu_{RES}(y) dy}{\int_a^b \mu_{RES}(y) dy} \quad [4]$$

Le numérateur correspond au moment et le dénominateur à la surface.

### 5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### 5.1. SCENARI D'OCCUPATION

Le contrôle de la température moyenne du bâtiment est basé sur les scénarii de la RT 2005 définissant, entre autre, les types de bâtiments ainsi que les types d'occupations. 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 *longs* pour « horaire d'occupation », et *moyen* pour « niveau de température ». Pour notre étude, nous ne retenons pas les valeurs de l'usage bureau (*moyen, moyen*) car les variations ne sont pas assez significatives pour tester notre contrôle. Nous présentons sur les tableaux 2 et 3 les différents cas possible pour une stratégie de chaud.

| 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 2 : 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 3 : Températures de consigne conventionnelles en chauffage.

#### 5.2. REGULATION

Le contrôleur développé ici est un contrôleur flou de type MISO basé sur le principe évoqué précédemment. La structure de la boucle de régulation est illustrée sur la figure 4 de façon simplifiée.

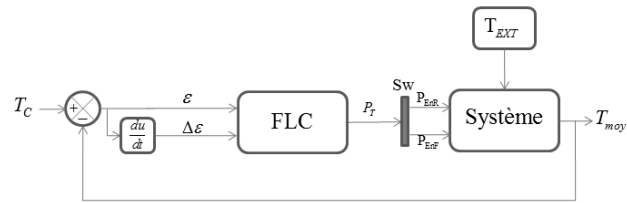


Figure 4 : Structure simplifiée de la boucle de régulation.

Les données réelles utilisées pour ces tests en simulation correspondent à la saison hivernale 2007.

La figure 5 montre les profils de température sur une période de 8 jours (soit 192 heures) prenant en compte les caractéristiques des scénarii évoqués précédemment. La consigne a été basée sur des horaires d'occupation et sur un niveau de température correspondant à un logement.

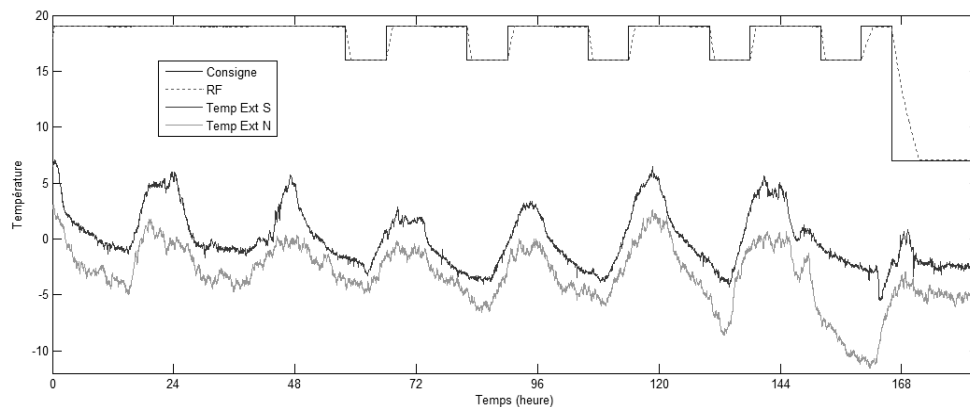


Figure 5 : Exemple de résultats obtenus avec le FLC.

Le suivi de consigne est très bien respecté. Les temps de réponse, correspondant aux temps de relâche évoqués dans la RT2005, sont de l'ordre de l'heure. La stratégie de contrôle utilisée ici est basée sur la réduction de temps de réponse et par conséquent de l'utilisation, jusqu'à saturation, des deux sources d'énergie disponibles. Il est possible d'augmenter légèrement ces temps de réponse afin de diminuer les consommations d'énergie fossile, tout dépend de la stratégie adoptée.

### 5.3. CONSOMMATION D'ENERGIE

La figure 6 indique les consommations d'énergie renouvelable (EnR) et fossile (EnF) sur la même période. L'EnF est utilisée comme source pour un chauffage d'appoint et à partir du moment où l'EnR est à saturation.

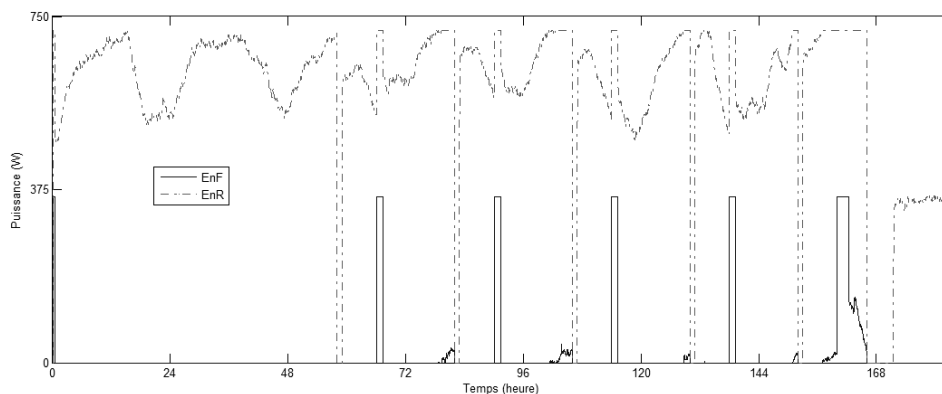


Figure 6 : Profils de puissances EnR et EnF.



Sur 8 jours, la consommation d'énergie totale est de 1263,4225 Wh/m<sup>2</sup>. La consommation en énergie renouvelable est de 1225,3Wh/m<sup>2</sup> et la consommation en énergie fossile est de 38,1225 Wh/m<sup>2</sup>, soit une réduction de l'énergie fossile de 97% par rapport au tout fossile. La réduction de la consommation des énergies fossiles est donc non négligeable et à long terme très importante.

## 6. CONCLUSION

Cet article présente les résultats d'une étude ayant comme objectif de réduire les consommations d'énergie fossiles et d'optimiser l'utilisation des énergies renouvelables au sein des bâtiments. Il s'agit ici de tests en simulation dont les performances permettent d'estimer une réduction de 97% de l'énergie fossile.

Le contrôleur à base de logique floue a montré des caractéristiques performantes, tant au niveau de du temps de réponse qu'au niveau du suivi de consigne. Des tests similaires, effectués avec un contrôleur PID et une MPC, ont montré des résultats semblables mais avec une légère diminution de la consommation d'énergie renouvelable et des temps de calcul beaucoup plus importants.

Cette boucle de régulation sera prochainement implémentée en condition réelle sur une pièce et fera l'objet d'un autre article. Il est aisément possible d'améliorer les performances du contrôleur flou en augmentant le nombre de sous-ensembles flous des variables et par conséquent en augmentant le nombre de règles. Il est également envisagé de tester un contrôleur PID flou.

## 7. REFERENCES

- ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) (2007). *Les chiffres clés du bâtiment en 2006*, Publications de l'ADEME.
- Journal Officiel (2006). *Décret n°2006-592 du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions*, République française.
- CSTB (2006). *Réglementation thermique 2005 : Nouvelle réglementation à la mesure des enjeux énergétiques, économiques, sociaux et environnementaux*, Presse du CSTB, 550p.
- Lygouras J.N., Botsaris P.N., Vourvoulakis J., Kodogiannis V. (2007). Fuzzy logic controller implementation for a solar air-conditioning system, *Applied Energy* Volume 84, pp 1305-1318.
- Guanrong C., Trung T.P. (2001). *Introduction to fuzzy sets, fuzzy logics and fuzzy control systems* ISBN 0-8493-1658-8, CRC Press LLC.
- Nougier, J.P. (1993). *Méthodes de calculs numériques*, Masson.
- Paris B., Eynard J., François G., Talbert T., Polit M. (2008). A prototype for on-line monitoring and control of energy performance for renewable energy buildings, *International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics ICINCO'2008*, Portugal.
- Sacadura, J.F. (1993). *Initiation aux transferts thermiques*, Technique et Documentation.
- Traore A. (2003), *Logique floue et contrôle supervisé des procédés biologiques de dépollution*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II.
- Zadeh L.A. (1976). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, I-III, *Information Sciences* 9, pp 43-80.
- Zadeh L.A. (1978). PRUF-a meaning representation language for natural languages, *Int. J. Man-Machine Studies*, volume 10, pp 395-460.