

# Simulation temps réel pour la gestion des flux énergétiques dans l'habitat.

Rim MISSAOUI<sup>1-2</sup>, Ghaith WARKOZEK<sup>1-2</sup>, Shadi ABRAS<sup>2</sup>, Stéphane PLOIX<sup>2</sup>, Seddik BACHA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> G2Elab – Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble

ENSE3 : 961, Rue de la Houille Blanche, 38402 Saint Martin d'Hères,

[Rim.missaoui@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:Rim.missaoui@g2elab.grenoble-inp.fr), [ghaith.warkozek@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:ghaith.warkozek@g2elab.grenoble-inp.fr)  
[seddik.bacha@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:seddik.bacha@g2elab.grenoble-inp.fr)

<sup>2</sup> G-SCOP – Laboratoire des sciences pour la conception, l'optimisation et la production

INPG : 46, Avenue Félix viallet, 38 031 Grenoble Cedex 1, France.

[stephane.ploix@inpg.fr](mailto:stephane.ploix@inpg.fr), [shadi.abras@inpg.fr](mailto:shadi.abras@inpg.fr)

---

*RESUME.* Le secteur de bâtiment représente 43% de la consommation totale du pays en énergie primaire. Pour cette raison, le bâtiment est considéré comme un énorme gisement potentiel d'économies d'énergie, d'où l'existence de nombreux travaux de recherche sur ce thème. Parmi ces derniers travaux, le projet ANR Multisol a proposé une solution pour la gestion des flux énergétique dans le bâtiment en gérant les équipements du système bâtiment. Or, pour valider des algorithmes de pilotage global sur des modèles fins de systèmes bâtiment, il faut disposer de simulateur pouvant interopérer avec des systèmes de gestion énergétique. Ce travail présente une solution de simulation temps-réel interconnectée avec un système de gestion des flux énergétiques qui permet de réaliser des simulations fines du système bâtiment.

*MOTS-CLÉS :* Gestion d'énergie, application bâtiment, simulation temps réel.

---

*ABSTRACT.* Building sector accounts for 43% of the country's total consumption of primary energy. Due to that, building is considered as encouraging potential of energy saving and a lot of researches have been developed in this topic. Among of these works, the ANR Multisol proposed a solution for the management of energy flows thanks to a building manager system. However, to validate global control algorithms, a simulator capable of interoperating with energy management systems must be used. This work presents a solution for real-time simulation with a networked system that manages energy flows. It makes it possible to perform fine simulations of the physics of building system.

*KEYWORDS:* Energy management, application building, real-time simulation

---

## 1. INTRODUCTION

Le bâtiment est le premier secteur consommateur d'énergie en France, devant les transports et l'industrie. Il représente également 25% des émissions de dioxyde de carbone sur le plan national [Web\_ADEME]. Ainsi il est possible de réduire la consommation énergétique nationale et de limiter l'effet de serre en agissant sur les secteurs de la construction et de la rénovation du parc immobilier existant.

(Wacks, 1993) a proposé une solution pour réduire la consommation énergétique dans le bâtiment qui se base sur la gestion des charges : elle est appelé *contrôle distribué* à travers un réseau de communication permettant le contrôle/commande de système domotique (Palensky *et al.*, 1997). Depuis, plusieurs travaux ont été réalisés dans le but de construire un système de gestion, capable de déterminer le meilleur plan d'affectation de l'énergie, selon des critères donnés.

Le but des travaux présentés est de montrer comment valider un système de gestion des charges électriques tel que celui proposé dans (Ha *et al.* 2006a) et (Ha *et al.* 2006b), en s'appuyant sur un simulateur temps-réel permettant de synchroniser le simulateur et le système de gestion énergétique sur le temps réel par opposition au temps accéléré. Le simulateur RT\_Lab utilisé est doté d'une capacité de calcul telle qu'il est possible de simuler des équipements à la micro-seconde près. La liaison entre le système de gestion de flux énergétiques et le simulateur du système bâtiment a nécessité la construction d'une interface XML développée en JAVA.

## 2. PRINCIPE DE VALIDATION DES ALGORITHMES DE GESTION DES FLUX ENERGETIQUES.

### 2.1. PRINCIPE DE MECANISME DE CONTROLE.

Un enjeu important dans les problèmes de domotique est l'incertitude sur les modèles et sur les données prédites comme le rayonnement solaire, la température extérieure ou les services demandés par les occupants. Afin de résoudre ce problème, une architecture à trois couches est présentée dans la figure 1 (Ha *et al.*, 2010) : une couche d'anticipation, une couche réactive et une couche locale.

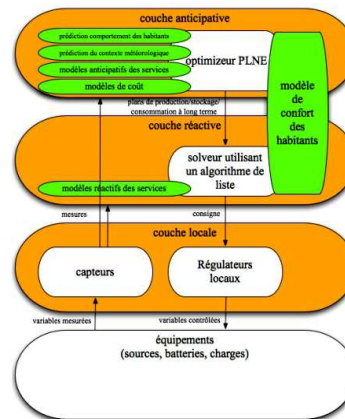


Figure 1 : Le système multi-couche de gestion d'énergie

#### 2.1.1. Première couche de commande : la couche anticipative

La couche anticipative comporte la commande qui travaille sur des grandeurs moyennes associées à des périodes de temps longues (typiquement 1 heure) dans le système de gestion. Son objectif est de planifier la consommation et la production de l'énergie sur un horizon temporel long de l'ordre d'une journée. La prédiction se base sur des prévisions météorologiques et des programmations des équipements du bâtiment par l'utilisateur.

Si la consommation de l'ensemble des équipements pouvait être prévue, il serait possible d'organiser et de planifier leur fonctionnement à l'avance. Par exemple, pour le chauffage électrique d'une pièce, on peut calculer la durée et la quantité de la surchauffe « anticipée » qui permettrait de réduire la consommation pendant une période de fonctionnement quand l'énergie est indisponible ou restreinte. Pour le cas d'un service décalable dans le temps comme la machine à laver par exemple, on peut retarder ou avancer son démarrage pour organiser la consommation globale (Abrams, 2009).

### 2.1.2. *Deuxième couche de commande : la couche réactive.*

Comme le mécanisme anticipatif travaille avec des valeurs moyennes sur des périodes relativement longues sur la base de prédiction de besoins énergétiques, un niveau plus fin permettant de réagir aux aléas (erreurs de modélisation et erreurs de prédiction) est nécessaire. Ce niveau fonctionne à une période de temps courte (typiquement 1 minute) par rapport à la couche anticipative, afin de respecter le critère de confort pour les occupants et les contraintes de capacité des sources d'énergie. Pratiquement, si la situation réelle s'écarte trop du plan anticipatif, plus de assez de ressources énergétiques par exemple, la couche réactive va intervenir en délestant la consommation de certains équipements dans le but de rétablir l'équilibre énergétique. Puisque l'échelle de temps est faible comparée au mécanisme anticipatif, les ajustements calculés par la couche réactive restent, si les prédictions sont bonnes, négligeables pour la couche anticipative qui ne calcule que des valeurs moyennes (Ha, 2007).

### 2.1.3. *Troisième couche de commande : la couche locale*

Cette couche de commande est la couche ayant la dynamique la plus rapide. Son objectif est d'atteindre les consignes de fonctionnement qui ont été calculées par la couche anticipative, et éventuellement ajustées par la couche réactive. Par exemple, dans un environnement thermique, ce mécanisme fonctionne en commandant en tout ou rien pour maintenir la température de ce dernier à des valeurs proches de la température de consigne. Il est conçu prévu par les fabricants d'équipements et n'est pas modifié.

## 2.2. *BESOIN DE VALIDATION A PARTIR DES MODELES FINS.*

Le principal avantage du temps réel par rapport à la simulation virtuelle est d'une part que la synchronisation du système de gestion énergétique avec le modèle physique se fait naturellement sur le temps réel et d'autre part, que la simulation peut intégrer de «vrais» équipements (Santo *et al*, 2004). La validation consiste ici à évaluer les performances du système de gestion énergétique sur des données simulées à une échelle de temps très fine, jusqu'à des pas d'une  $\mu s$ , et permet de s'affranchir de l'instrumentation d'un système bâtiment réel. La modélisation du bâtiment pour la simulation revient à modéliser finement les sources et les charges électriques.

## 3. **CONSTRUCTION DE MODELES POUR LA VALIDATION :**

Dans un premier temps, nous avons modélisé un bâtiment multi-charges alimenté par le réseau électrique afin de valider les algorithmes de contrôle/commande global issus du projet MULTISOL. La modélisation a été faite sur MATLAB/Simulink complétée d'une bibliothèque spécifique du temps réel [Web-RT\_LAB].

Le réseau de distribution est modélisé par une simple source de tension pilotable avec un interrupteur contrôlé en sur-courant (limité à la valeur imposée par l'abonnement). La source n'est pas pilotable par le superviseur. On a fixé une puissance d'abonnement maximale, 1750W entre minuit et 5 heures le matin et de 3500W pour le reste de la journée.

### 3.1. MODELISATION DES CHARGES

#### 3.1.1. Le chauffage

Le modèle choisi (Kampf *et al.*, 2006) dépend de plusieurs facteurs tels que, la structure (surfaces des chambres, hauteur et matériaux des murs et l'isolation, nombre des fenêtres...etc.), la température à l'extérieure, l'ensoleillement. Il peut être formulé comme suit:

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_i}{dt} \\ \frac{dT_m}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{r_i C_i} + \frac{1}{r_m C_i}\right) & \frac{1}{r_m C_i} \\ \frac{1}{r_m C_m} & -\frac{1}{r_m C_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{r_m C_i} & \frac{1}{C_i} & \frac{SF}{C_i} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ \Phi_h \\ \Phi_s \end{bmatrix} \quad [1]$$

- $T_i$  : Température dans la chambre  $i$  [K]
- $T_m$  : Température de l'enveloppe de la pièce [K]
- $T_{ext}$  : Température ambiante (à l'extérieure du bâtiment) [K]
- $C_i$  : Capacité thermique de l'air dans la chambre  $i$  [J/K].
- $C_m$  : Capacité thermique de l'enveloppe de la pièce [J/K]
- $\Phi_h$  : Flux thermique donnée par le radiateur [W].
- $\Phi_s$  : Flux thermique donnée par le soleil via la fenêtre [W].
- $r_i, r_m$  : Résistances de transfert thermique [K/W]
- $SF$  : Surface de la fenêtre [m<sup>2</sup>].

Nous avons implémenté le comportement dynamique de chauffage en MATLAB/Simulink, la figure 2 présente ce modèle :

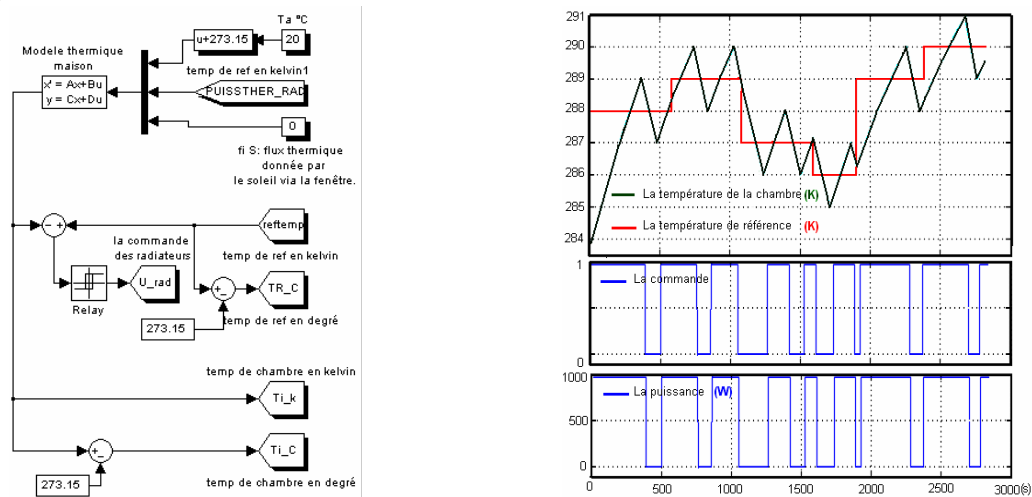


Figure 2 : Le modèle de chauffage de la chambre

#### 3.1.2. Le réfrigérateur/Congélateur

Le réfrigérateur et le congélateur sont des services thermiques dont les modèles sont proches de celui d'une pièce avec radiateur, mais sans apport gratuit. Le modèle est le même que celui utilisé par les algorithmes de contrôle/commande.

$$\text{sur } T_{\text{cool}}; \frac{d(T - T_{ext})}{dt} = -\frac{1}{\tau} (T - T_{ext}) + \frac{K}{\tau} P_{\text{max}}$$

$$\text{sur } T_{\text{stop}}; \frac{d(T - T_{ext})}{dt} = -\frac{1}{\tau} (T - T_{ext})$$

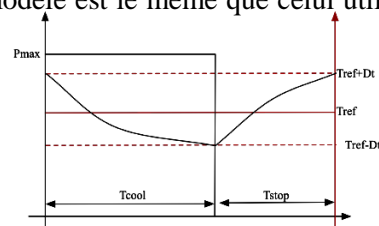


Figure 3 : Le modèle réfrigérateur

### 3.1.3. Le lave-linge

Nous avons modélisé le comportement du lave-linge en trois cycles de fonctionnement. Le modèle sera complexifié dans la suite. L'implémentation sous MATLAB a été réalisée par un bloc « Embedded MATLAB Function » représenté par la figure suivante :

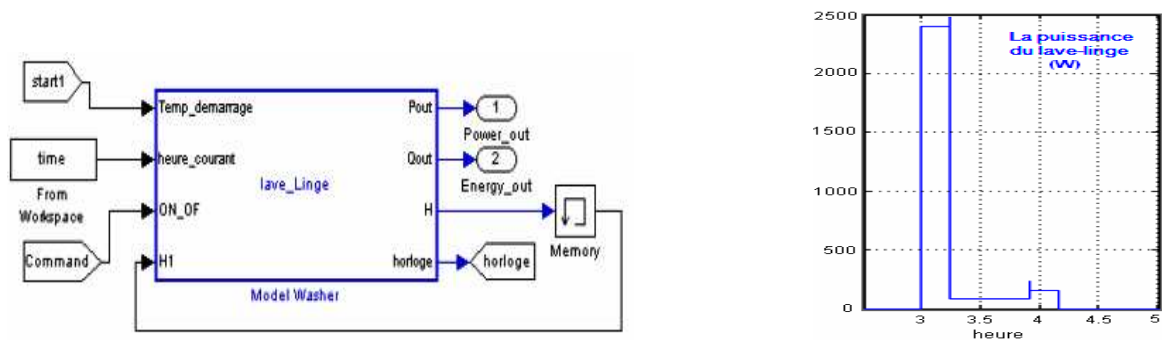


Figure 4 : Le modèle de lave linge

	Durée du cycle (mn)	Puissance du cycle (W)
Température	30/40°C	
Durée moy. de cycle	70	
Chauffage	15	2400
Lavage et Rinçage	40	80
Essorage	15	150

Tableau 1: Répartition d'énergie et la durée moyenne de cycles

Après la modélisation des charges et des sources, ces modèles vont être utilisés pour valider en temps réel un système de contrôle/commande

## 4. RESULTAT DE VALIDATION EN TEMPS REEL

### 4.1. PLATE FORME TEMPS REEL

En effet, La simulation en temps réel se fait avec une plateforme temps réel qui s'appelle RT-LAB. Une de ses caractéristiques essentielles est l'intégration parfaite avec MATLAB/Simulink..



Figure 5 : Plate forme temps réel

L'environnement de test est formé de deux ordinateurs et du simulateur temps réel hybride RT\_LAB. Le premier ordinateur servira à concevoir les modèles de simulation du système bâtiment et à visualiser les résultats de simulation. La station 2 est une station de commande qui est consacrée aux algorithmes de gestion de flux énergétiques. Nous allons présenter la fonctionnalité de ce système dans le paragraphe suivant.

#### 4.2. LE SIMULATEUR RT-LAB

RT-LAB est une technologie temps réel qui facilite la conception basée sur la modélisation.. Il est extensible car il permet au développeur d'augmenter la puissance de calcul quand il en a besoin (on peut atteindre jusqu'à 10 microsecondes (100 kHz) avec une latence se mesurant en nanosecondes [Web\_RT-LAB]) que ce soit pour la simulation rapide ou pour la simulation avec matériel de type Hardware-In-the-Loop (Schlager, 2008).

RT-LAB permet de convertir des modèles Simulink pour les implémenter dans un environnement temps réel grâce à Real-Time Workshop (RTW) ou Autocode, puis de les exécuter sur un ou plusieurs processeurs. Il existe deux moyens de communications entre les processeurs hôtes et les processeurs d'exécution, le premier via des Entrées/Sorties physiques, le deuxième via une connexion Ethernet TCP/IP, très intéressante parce qu'elle permet de communiquer avec l'extérieur. Il devient ainsi facile de coupler un simulateur avec un système de gestion énergétique.

#### 4.3. INTERFACE XML

Le système de gestion énergétique développé par G-SCOP doit pouvoir agir sur le simulateur. Il faut donc construire un tunnel de communication qui passe d'une part, les commandes du système de gestion énergétique vers les modèles simulés par RT\_LAB, et d'autre part, qui transfère les variables d'état du simulateur vers le système de gestion énergétique. Pour atteindre cet objectif, nous avons conçu l'architecture présentée dans la figure 6 ; il s'agit d'établir un *socket* pour chaque modèle (service), puis de faire passer les commandes et les mesures via ce *socket*. Chaque service simulé dans le RT\_LAB a un homologue dans le système de gestion énergétique ; la correspondance se fait par le numéro de port de chaque *socket*. La configuration de ce système se fait grâce aux paramètres suivants :

- Le nombre de services.
- Les adresses IP et les numéros de port pour chaque service.
- Les variables à transférer entre le simulateur et le système de gestion énergétique.

La figure 6 montre l'interface composée de deux parties : Interface RT\_LAB et Bridge. Cette interface doit être décomposée en deux parties pour des raisons techniques liées au simulateur lui-même. En effet, lorsqu'il envoie des mesures, le simulateur arrange les données dans un format qui lui est propre. Le Bridge, qui établit les *sockets* TCP/IP, organise l'envoi dans les deux sens. Ces packages ont été développés en Java.

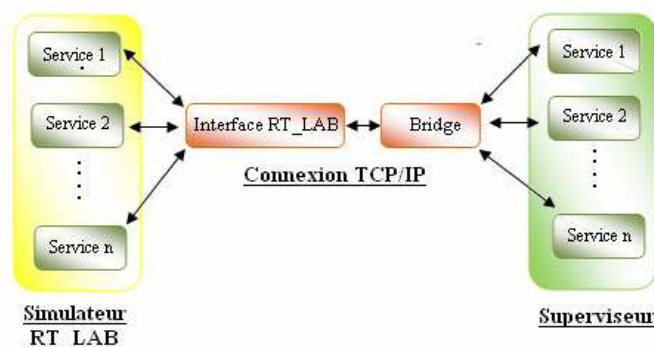


Figure 6: Interface XML.

## 5. RESULTATS DE SIMULATION :

Pour un premier cas d'étude, le système modélisé comporte : le réseau comme une source d'énergie électrique, un radiateur avec son comportement thermique, le réfrigérateur et la lave linge comme charges électrique. Entre ces différents services et le système de contrôle commande, il y a un envoi et réception instantanée des données comme le montre la figure suivante :

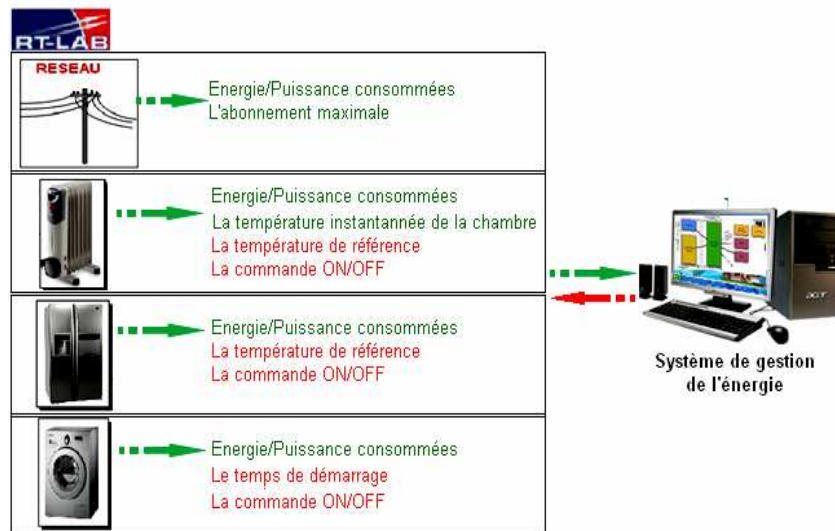


Figure 7: Données échangées entre le simulateur et le système de gestion énergétique

La figure suivante représente l'interface graphique du système de gestion énergétique. Elle montre bien les valeurs des données échangées entre le superviseur MULTISOL et RT\_LAB : la puissance, l'énergie consommée et les ordres de commande pour chaque équipement, les températures de référence pour le chauffage et le réfrigérateur, le pourcentage de la satisfaction de l'utilisateur qui est donnée par le superviseur, ect...



Figure 8: Interface graphique des résultats de simulation temps réel

Les figures suivantes montrent, la simulation en temps réel du modèle de chauffage et de réfrigérateur qui reçoivent respectivement 294K et 275K comme des valeurs de température de référence. Ces deux valeurs sont calculées par le solveur et envoyé par le superviseur.

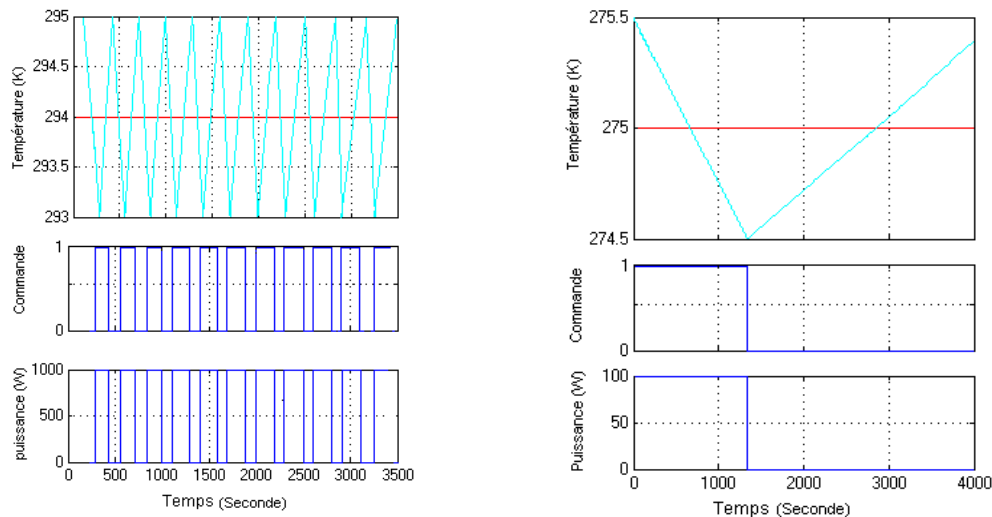


Figure9: Résultats de simulation de chauffage (à gauche) d'une chambre et le réfrigérateur (à droite) en temps réel

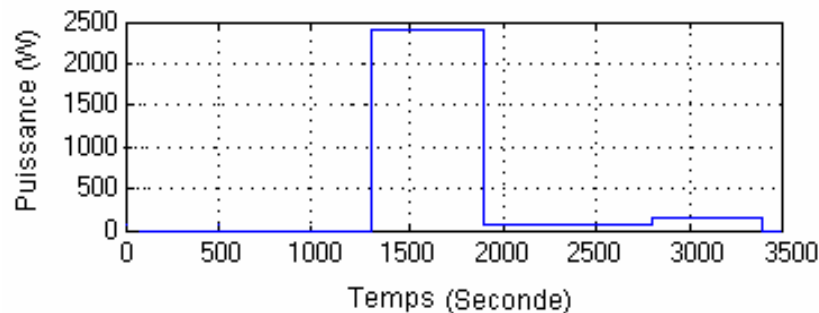


Figure10: Résultats de simulation de lave linge en temps réel.

Ainsi, selon la puissance de réseau électrique disponible (3500W), le superviseur MULTISOL a décidé de faire fonctionner la machine à laver l'après midi vers 17h et lancer le cycle de chauffage d'eau à 2400W. A cette heure, il y a que le radiateur qui fonctionne à 1000W.

## 6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES :

Ce travail propose une architecture de validation en temps réel de systèmes de gestion de l'énergie dans le bâtiment. Il présente des résultats de simulation qui permettent à la validation des algorithmes de gestion du système bâtiment issus du projet MULTISOL. La validation a été obtenue grâce à la plateforme de simulation temps réel « RT\_LAB » capable de réaliser des calculs à un pas de temps allant jusqu'à 10 $\mu$ s.

Dans un premier temps la validation a concerné le système de chauffage, le réfrigérateur et le lave linge, connectés au réseau électrique. Le scénario adopté pour le fonctionnement du système était de fixer une puissance du réseau électrique. En tenant que de la puissance électrique disponible, le superviseur a calculé puis appliqué un plan pour le fonctionnement des différents équipements d'un bâtiment. Les températures de référence pour les deux premiers services de chauffage, optimal au sens du critère coût/confort, et le meilleur temps de démarrage pour la machine à laver ont été déterminés.

La suite de ce travail étendra la validation à des sources d'énergie photovoltaïque avec d'autres charges comme l'éclairage, la cuisson, le four, le micro-onde ... mais aussi à une meilleure prise en compte de l'impact des occupants. Une fois que la validation des algorithmes de la gestion de l'énergie faite, à travers des modèles de bâtiment sur MATLAB/Simulink, on pourra par la suite faire une simulation Hardware-In-The-Loop en utilisant des vraies sources d'énergie électrique et des vrais équipements pour suivre l'implantation sur site démonstrateur à l'échelle 1.

## 7. REFERENCES :

(Abrams 2009) S. Abrams, *Système domotique Multi-Agents pour la gestion de l'énergie dans l'habitat*. Thèse de Doctorat - Institut National Polytechnique de Grenoble (INP Grenoble) Grenoble, Mai, 2009, chapitre 5 et 6, page 61-129.

(Ha et al. 2006a) Ha, D. L., Ploix, S., Zamai, E. & Jacomino, M. 2006. *A home automation system to improve the household energy control*, INCOM2006 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing.

(Ha et al. 2006b) Ha, D. L., Ploix, S., Zamai, E. & Jacomino, M. 2006. *Tabu search for the optimization of household energy consumption*, The 2006 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration IEEE IRI 2006: Heuristic Systems Engineering September 16-18, 2006, Waikoloa, Hawaii, USA.

(Ha et al., 2010) Duy Long Ha, Stephane Ploix, Mireille Jacomino and Minh Hoang Le (2010). *Home energy management problem: towards an optimal and robust solution*. Energy Management, Francisco Macia Perez (Ed.), ISBN: 978-953-307-065-0, INTECH, Available from: <http://sciyo.com/articles/show/title/home-energy-management-problem-towards-an-optimal-and-robust-solution>

(Ha, 2007) Duy Ha, L. (2007). *Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation*. Thèse de Doctorat - Institut National Polytechnique de Grenoble (INP Grenoble) Grenoble, Septembre, 2007.

(Kampf et al., 2006) Kampf, J. H. et Robinson, D. (2006). *A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows*. Energy and Building, InPress. (cité page 58).

(Palensky et al., 1997) Palensky, P., Posta, R., 1997. *Demand side management in private home using lonworks*. In : Proceedings.1997 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems.

(Santo et al, 2004).S. E. Santo et V. A. B. França, "FURNAS experience on real-time computer simulations of power systems," in *Proc. IEEE Power Systems Conf. Expo.*, 2004.

(Schlager, 2008). [Martin Schlager](#) Hardware-In-The-Loop Simulation -30/04/08

(Wacks, 1993) Wacks, K., 1993. *The impact of home automation on power electronics*. In : Applied Power Electronics Conference and Exposition. pp. 3 - 9.

[Web\_ADEME], *Les Energies et Matières Premières Renouvelables en France*. Site ADEME <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=15019>

[Web\_Multisol]. Séminaire ANR Solaire photovoltaïque 2007 – Chambéry – 17 et 18 décembre 2007 Disponible en ligne. <http://www-anr-pv.cea.fr/home/liblocal/docs/Seminaire2007/MULTISOL.pdf>

[Web\_RT\_LAB]. [http://www.opal-rt.com/sites/default/files/rtlab\\_brochure\\_en.pdf](http://www.opal-rt.com/sites/default/files/rtlab_brochure_en.pdf).