

Simulation de performance d'un système multi-sources d'énergie en utilisant le plancher chauffant pour chauffer un bâtiment

Shaokun LU ^{1,3}, DuyLong HA ², Eric ZAMAI ², Seddik BACHA ³, André MANIFICAT ¹

¹GRETh, Savoie Technolac, 50 av. du lac Léman, BP302, 73375 Le Bourget du Lac. Shaokun.lu@greth.fr

²G-SCOP, INPG, 46 av. Félix Viallet, 38031 Grenoble Cedex 1

³G2Elab, ENSIEG - BP 46, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex

RESUME. Ce travail de recherche est cofinancé par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) et le GRETh (Groupement pour la Recherche sur des Echangeur Thermique). Dans cet article, on présente :

- *En premier, la modélisation pour les composants thermique du bâtiment y compris le générateur thermique de type de couplage de pompe à chaleur et capteur solaire, l'émetteur thermique de type de plancher chauffant et le ballon de stockage de l'eau chaude.*
- *En second, l'implémentation des modèles sous l'environnement Matlab/Simulink et le contrôle 'tout ou rien'*
- *En troisième point, la discussion sur les résultats de simulation tant sur la consommation d'énergie qu'au niveau de confort.*

MOTS CLES: Simulation, Pompe à chaleur, Plancher chauffant, management énergétique du bâtiment

ABSTRACT. This research work is financed by ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) and GRETh (Groupement pour la Recherche sur les Echangeur Thermique). In this article, tow main objects are presented:

- *Firstly, the modelling of a floor heating system as the thermal distributor, a heat pump and a thermal solar collector as the thermal generator and a storage tank*
- *Secondly, the implementation of the models in the Matlab/Simulink environment and the 'start/stop' control.*
- *Thirdly, the discussion of the simulation results both in energy consumption and comfort level*

KEY WORDS: Simulation, Heat pump, Floor heating, Building energy management system

1. INTRODUCTION

Utilisation d'un système multi-sources d'énergie dans le bâtiment permet de réduire la consommation d'énergie primaire, baisser la production de gaz à l'effet de serre et couvrir le maximum de besoins énergétiques avec la meilleure efficacité.

L'architecture physique et algorithmique d'un système multi-sources d'énergie pour le bâtiment est présentée dans la figure 1. Elle comporte quatre parties fondamentales.

- 1) Les sources d'énergie, qui peuvent être l'électricité, le gaz, le réseau de chaud/froid, des énergies renouvelables ou fossiles ou encore une combinaison d'entre elles.
- 2) Le système énergétique, qui est regroupé dans un système de conversion d'énergie (pompe à chaleur, ballon de stockage et chaudière) et un système de distribution d'énergie dans le bâtiment (chauffage, eau chaude sanitaire etc.).

- 3) La demande de l'utilisateur
- 4) Le système de gestion et de contrôle dynamique intelligent, qui tient compte d'une fonction de satisfaction, de besoins d'efficacité, de la disponibilité des sources, des contraintes et du coût de chaque ressource d'énergie et enfin des prévisions météorologiques, de consommation...

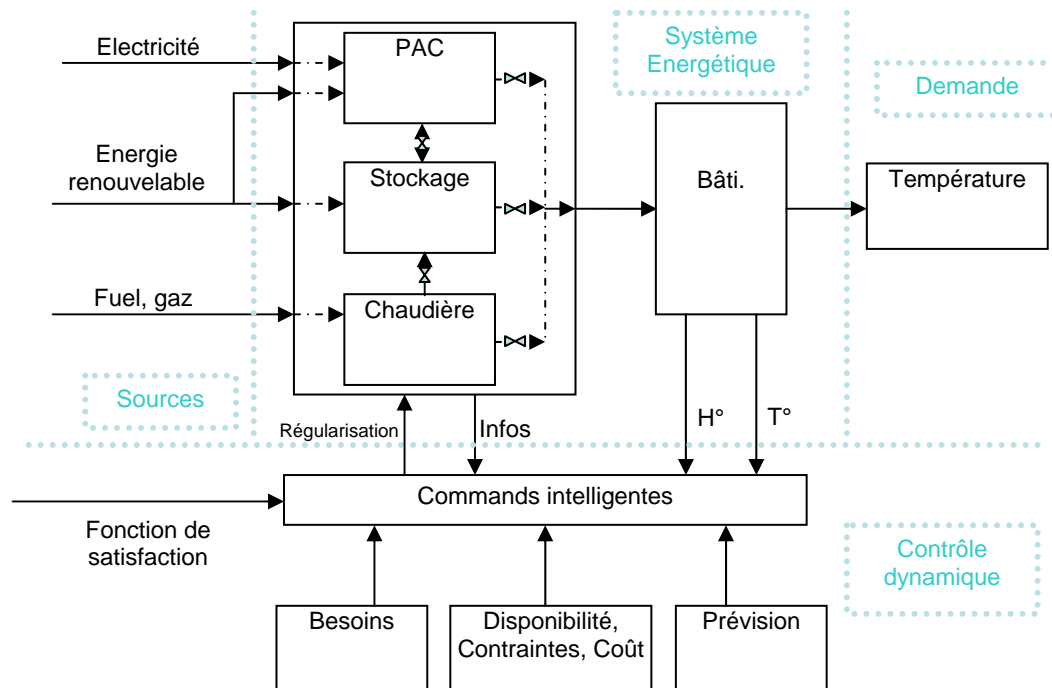


Figure 1. Système énergétique du bâtiment

L'objectif de ce travail est de donner une vision globale sur la performance d'un système énergétique du bâtiment qui concerne :

- La consommation d'énergie électrique
- La consommation d'énergie renouvelable
- La température de l'air intérieur demandée par l'utilisateur
- Le fonctionnement efficace de la PAC

2. MODELES MATHEMATIQUES

Dans la partie qui suit on présente les modèles mathématiques choisis pour représenter les composants.

2.1. MODELE DU BATIMENT

La représentation d'état est utilisée pour la modélisation du bâtiment. Le modèle du bâtiment est considéré comme un réseau thermique dont on fait une analogie avec un réseau électrique (Manohar et al. 2004). Le détail de l'analogie est présenté ici :

- Les nœuds correspondent aux composants du bâtiment (air, mur, plafond, plancher, etc.)
- La température correspond à la tension.
- Le flux thermique correspond au courant
- Les capacités thermiques correspondent aux capacités électriques

En combinant des équations thermiques linéaires qui suivent, un modèle d'état sera créé.

$$\text{Mur : } \frac{dT_w}{dt} = \frac{A_w}{C_w} [U_{wi} (T_{ai} - T_w) + U_{wo} (T_{ao} - T_w)] \quad [1]$$

$$\text{Plancher:} \quad \frac{dT_f}{dt} = \frac{A_f}{C_f} \left[\frac{pQ_s}{A_f} + U_f (T_{ai} - T_f) + \frac{Q_{water}}{A_f} \right] \quad [2]$$

$$\text{Plafond :} \quad \frac{dT_c}{dt} = \frac{A_c}{C_c} [U_{ci} (T_{ai} - T_c) + U_{co} (T_{ao} - T_c)] \quad [3]$$

$$\text{Air intérieur :} \quad \frac{dT_{ai}}{dt} = \frac{1}{C_a} \left[Q_e + A_g U_g (T_{ao} - T_{ai}) + A_w U_{wi} (T_w - T_{ai}) + A_f U_f (T_f - T_{ai}) + A_c U_c (T_c - T_{ai}) \right] \quad [4]$$

La transformation des équations des composants sous forme d'état est donnée ci-dessous :

$$\dot{X} = A.x + Bu \quad [5]$$

$$\begin{aligned} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{T}_w \\ \dot{T}_f \\ \dot{T}_c \\ \dot{T}_{ai} \end{bmatrix}}_{\dot{X}} &= \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{A_w}{C_w}(U_{wi} + U_{wo}) & 0 & 0 & \frac{A_{wi}U_{wi}}{C_w} \\ 0 & -\frac{A_f U_f}{C_f} & 0 & \frac{A_f U_f}{C_f} \\ 0 & 0 & -\frac{A_c}{C_c}(U_{ci} + U_{co}) & \frac{A_{ci}U_{ci}}{C_c} \\ \frac{A_w U_{wi}}{C_a} & \frac{A_f U_{fi}}{C_a} & \frac{A_c U_{ci}}{C_a} & -\frac{1}{C_a} (A_g U_g + A_w U_{wi} + A_f U_f + A_c U_c) \end{bmatrix}}_A \times \underbrace{\begin{bmatrix} T_w \\ T_f \\ T_c \\ T_{ai} \end{bmatrix}}_X \\ &+ \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{A_w U_{wo}}{C_w} \\ 0 & \frac{p}{C_f} & \frac{1}{C_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{A_c U_{co}}{C_c} \\ \frac{1}{C_a} & 0 & 0 & \frac{A_g U_g}{C_a} \end{bmatrix}}_B \times \underbrace{\begin{bmatrix} Q_e \\ Q_s \\ Q_{water} \\ T_{ao} \end{bmatrix}}_u \end{aligned} \quad [6]$$

Ici :

- \dot{X} : Vecteur dérivé de la température
- A, B : Matrices d'état et d'entrée
- X : Vecteur de température
- u : Vecteur d'entrée

2.2. MODELE DU PLANCHER CHAUFFANT

Le transfert thermique dans le plancher chauffant est très difficile à modéliser sous un environnement Simulink. On présente ici une méthode simple qui se base sur une analyse de type « mécanique des fluides ».

En considérant des installations existantes de plancher chauffant, on choisit les paramètres suivants :

- Le diamètre du tube : $l = 0.01m$.
- Le flux massique de l'eau dans le tube : $\dot{m} = 0.02kg/s$, qui correspond à la vitesse $u = 0.255m/s$.

- La viscosité du fluide (eau) : $\nu = 0.8 \times 10^{-6} m^2/s$

Le nombre de Reynolds calculé est le suivant :

$$R_e = ul/\nu \approx 3200 \geq 2320(R_e \text{ critique}) \quad [7]$$

Ce nombre de Reynolds critique indique une zone de transition vers un changement de type d'écoulement comme indiqué il a la valeur suivante : $R_e^c = 2320$.

- Pour un écoulement $R_e \geq R_e^c$, on dira que l'écoulement est de type turbulent (typique pour un plancher chauffant)
- Pour un écoulement $R_e < R_e^c$, on dira que l'écoulement est de type laminaire

L'écoulement turbulent dans un plancher chauffant conduit à un très fort échange thermique entre l'eau et le plancher. Dans ces conditions, une hypothèse est proposée : la température de sortie de l'eau du tube est égale à celle du plancher.

Le modèle mathématique de transfert thermique du plancher chauffant est alors :

$$Q_{water} = \dot{m}_f Cp \Delta T_f = \dot{m}_f Cp (T_{f_in} - T_{f_out}) = \dot{m}_f Cp (T_{f_in} - T_f) \quad [8]$$

Dans cette méthode, la température de plancher chauffant est supposée uniforme. On néglige la résistance thermique du plancher chauffant qu'on considère comme facteur prépondérant de l'inertie du système qui induit cette uniformité.

2.3. MODELE DE LA POMPE A CHALEUR

Une pompe à chaleur est un dispositif thermodynamique permettant le transfert d'énergie calorifique d'un milieu froid vers un milieu plus chaud et donc de le chauffer, (la réciproque est vrai), alors que spontanément la chaleur diffuse du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid jusqu'à égalité des températures.

Le COP (coefficient de performance) est un critère essentiel pour mesurer la performance de la PAC (Pompe à Chaleur). Il est défini par :

$$COP = (\text{Puissance produite})/(\text{Puissance consommée})$$

Une valeur de COP est donnée par un nombre qui indique graduellement l'efficacité du système. Il représente le rapport entre sa production et sa consommation énergétique. Plus ce chiffre est élevé plus l'efficacité est grande. En réalité, il est très difficile d'obtenir ce COP par modélisation du fait de la complexité de fonctionnement du système PAC. On utilise en général des modèles empiriques pour réduire le problème.

Le modèle expérimental utilisé (Jong et al. 2000) pour cette étude est le suivant :

$$COP = k_1 \cdot \frac{0.5T_{con_in} + 0.5T_{con_out} + 273.15}{(0.5T_{con_in} + 0.5T_{con_out}) - (0.5T_{eva_in} + 0.5T_{eva_out})}$$

$$C_{con} \frac{dT_{con_out}}{dt} = \dot{m}_{con_in} \cdot Cp \cdot (T_{con_in} - T_{con_out}) + COP \cdot Ehp \quad [9]$$

$$C_{eva} \frac{dT_{eva_out}}{dt} = \dot{m}_{eva_in} \cdot Cp \cdot (T_{eva_in} - T_{eva_out}) - (COP - 1) \cdot Ehp$$

Dans ce modèle, la première équation représente le COP de la PAC qui dépend de T_{con_in} , T_{con_out} , T_{eva_in} et T_{eva_out} . La deuxième équation représente le transfert thermique du condenseur. La troisième représente le transfert thermique de l'évaporateur. La température du condenseur et celle de l'évaporateur sont supposées uniformes.

2.4. MODELE DU STOCKAGE

Le ballon de stockage cumule l'énergie du capteur solaire. La température du ballon de stockage dépend de 3 facteurs :

- Température et flux massique d'entrée : T_{b_in} , \dot{m}_{b_in}
- Température et flux massique de sortie : T_{b_out} , \dot{m}_{b_out}
- Capacité de stockage : M

En considérant ces 3 facteurs, un modèle dynamique (A.W.M et al. 2003) du ballon de stockage est présenté ici:

$$M \cdot Cp \cdot \frac{dT_{b_out}}{dt} = \dot{m}_{b_in} \cdot Cp \cdot T_{b_in} - \dot{m}_{b_out} \cdot Cp \cdot T_{b_out} \quad [10]$$

2.5. MODELE DU CAPTEUR SOLAIRE

On présente ci dessous un modèle dynamique (A.W.M et al. 2003) de capteur solaire:

$$C_s \frac{dT_{s_out}}{dt} = \dot{m}_{s_in} \cdot Cp \cdot (T_{s_in} - T_{s_out}) + k_2 E_s - k_3 \left(\frac{T_{e_in} + T_{e_out}}{2} - T_{ao} \right) \quad [11]$$

2.6. MODELE DE RADIATION SOLAIRE ET DE TEMPERATURE EXTERNE

Une demi-onde de la sinusoïde représente la radiation solaire dans une journée (Figure2).

$$E_s = E_{s_pic} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{24 \times 3600} t\right) \quad [12]$$

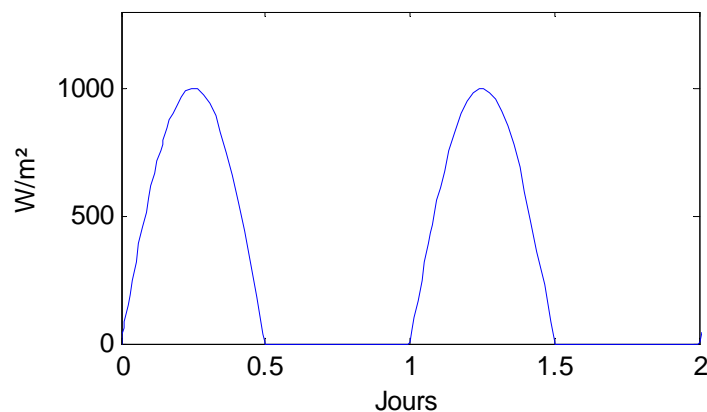


Figure2. Radiation solaire

On suppose que l'onde sinusoïdale suit la loi suivante :

- 7h-19h : période d'ensoleillement
- 19h-7h : période sans soleil
- Au sommet de la sinusoïde, la puissance est de 1kw/m², il est 13 heures.

La courbe de température de l'air extérieur est de la forme suivante:

$$T_{ao} = Am \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{24 \times 3600} t\right) + T_{ao_m} \quad [13]$$

Ici, $Am = 4^\circ C$; $T_{ao_m} = 2^\circ C$

2.7. IMPLEMENTATION DES MODELES

Tous les modèles sont implémentés dans l'environnement de Matlab/simulink. Le modèle du bâtiment représente une pièce d'un volume de $10m \times 4.6m \times 3m$, avec une fenêtre de dimension de $0.9m \times 2.1m$ sur le mur sud. On établit un tableau des paramètres d'un bâtiment isolé dont les valeurs sont reportées ci-dessous :

	ρ (kg/m ³)	A (m ²)	L (m)	M (kg)	U_o (W/m ² K)	U_i (W/m ² K)	C_p (J/kgK)	C (J/K)
Mur sud	1922	16.63	0.1	3215.24	1	0.5	759.49	$2.56 \cdot 10^6$
Mur nord	1922	18.58	0.1	3259.45	1	0.5	759.49	$2.85 \cdot 10^6$
Mur est	1922	13.94	0.1	2694.34	1	0.5	759.49	$2.16 \cdot 10^6$
Mur ouest	1922	13.94	0.1	2694.34	1	0.5	759.49	$2.16 \cdot 10^6$
Plancher	593	27.87	0.15	2517.44	0	8	2512.08	$5.12 \cdot 10^6$
Plafond		27.87		2041.17	1	0.5	2512.08	$5.12 \cdot 10^6$
Air	1.2			165.6			1000	165.6

Tableau1. Paramètres du modèle du bâtiment

Les matrices A et B sont également :

$$A = \begin{bmatrix} -9.75E-6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.25E-6 \\ 0 & -9.76E-6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.26E-6 \\ 0 & 0 & -9.68E-6 & 0 & 0 & 0 & 3.23E-6 \\ 0 & 0 & 0 & -9.68E-6 & 0 & 0 & 3.23E-6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -6E-5 & 0 & 6E-5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5.97E-5 & 1.99E-5 \\ 5.02E-5 & 5.61E-5 & 4.21E-5 & 4.21E-5 & 134.6E-5 & 8.41E-5 & -179.93E-5 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 6.5E-6 \\ 0 & 0 & 0 & 6.5E-6 \\ 0 & 0 & 0 & 6.45E-6 \\ 0 & 0 & 0 & 6.45E-6 \\ 0 & 2.15E-7 & 2.69E-7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.98E-5 \\ 6.04E-6 & 0 & 0 & 17.87E-5 \end{bmatrix}$$

Le contrôle commande 'tout ou rien' (2 points de contrôle) est très largement utilisée dans les systèmes thermiques du bâtiment. Dans cette étude, un bloc 'Relay' est utilisé pour simuler le contrôle commande 'tout ou rien' de la PAC. La température de démarrage de la PAC est à 20°C, celle d'arrêt est à 24°C

Le système est présenté ci-dessous sous forme de blocs dans l'environnement Simulink (Figure3.) :

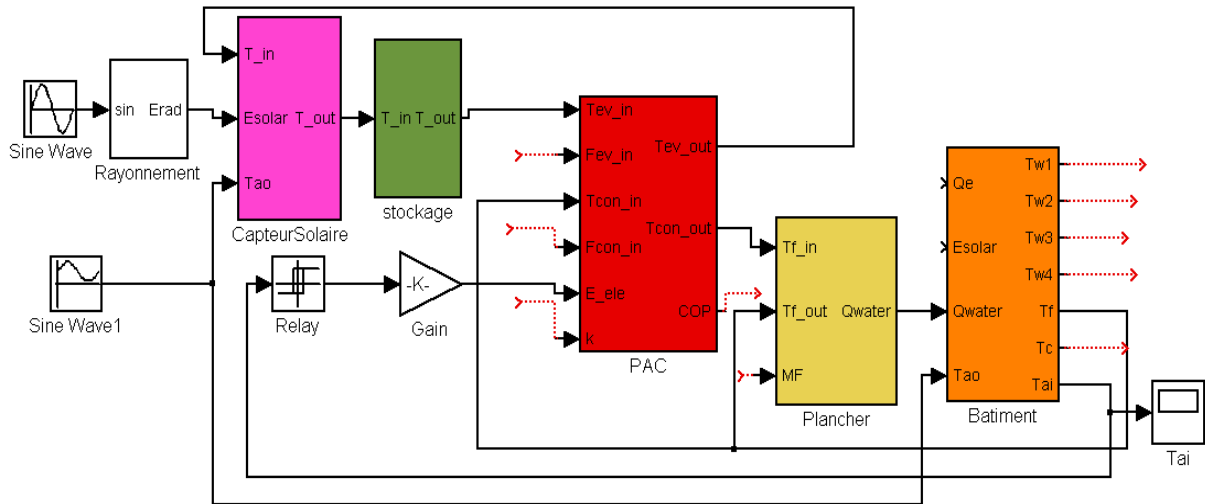


Figure3. Représentation du système sous Simulink

Le bloc «capteur solaire» et «rayonnement» font partie des ‘Sources’ dans la Figure1. Le bloc «stockage», «PAC», «plancher» et «bâtiment» font partie du ‘Système énergétique’. En collectant l’information de la température d’air intérieur, le block «Relay» contrôle le fonctionnement de la PAC, il fait office de ‘Contrôle dynamique’.

3. RESULTATS SUR 30 JOURS ET DISCUSSIONS

3.1 RESULTAT DE TEMPERATURE

La figure4 présente la comparaison de température de plancher, d’air intérieur et d’air extérieur.

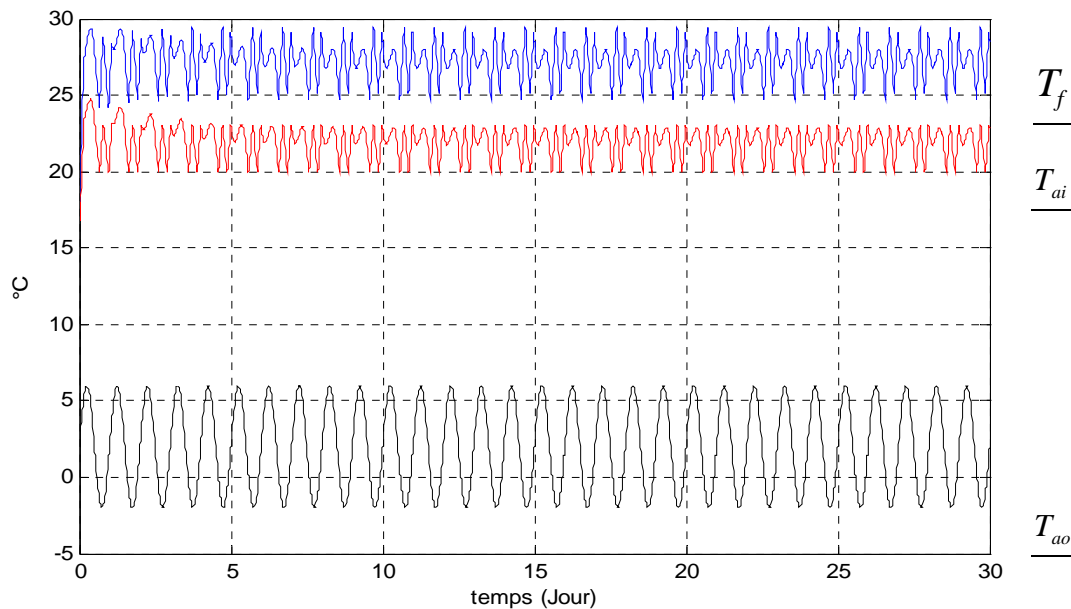


Figure4. Résultats de température

La courbe en haut T_f présente la variation de température du plancher chauffant. La variation entre 24 et 29°C se situe dans la demande de température de confort intérieur du bâtiment. La courbe au milieu T_{ai} présente la variation de la température de l’air intérieur entre 20-23°C, cet écart est idéal pour une ambiance intérieure. La courbe en bas T_{ao} présente la variation de température de l’air extérieur.

La courbe ci-dessous (Figure5) retrace la température de l'air intérieur dans la période de démarrage. L'air intérieur continue de baisser en température jusqu'à l'instant $t = 1160s$ et à $16.8^{\circ}C$.

On peut expliquer ce phénomène par la raison suivante : Pendant la période de démarrage, la plupart de la chaleur produite par la PAC est absorbé par le plancher. De par sa grande inertie thermique, le plancher voit sa température monter lentement. La température extérieure reste beaucoup plus basse que celle intérieure, l'air intérieur continu de se refroidir tant que la température du plancher n'a pas atteint un niveau suffisant pour assurer un transfert d'énergie au moins équivalent aux pertes thermiques.

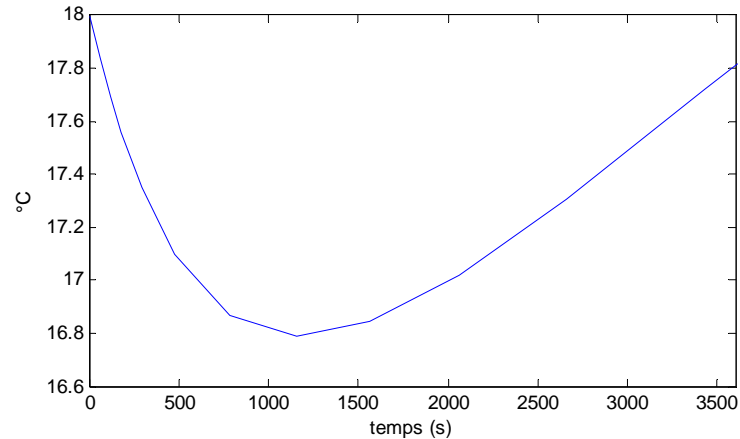


Figure5. Température d'air intérieur à la période de démarrage

3.2 RESULTAT DE CONSOMMATION

La Figure 6 présente les phases de fonctionnement de la PAC. Il y a 62 phases de fonctionnement pendant une période de 30 jours, soit environ 2 phases par jour. La première phase de fonctionnement, celle de démarrage est de 0 à 12000s, environs 3h20mins. Les phases de fonctionnement suivantes durent au minimum à 6000s (1h40mins).

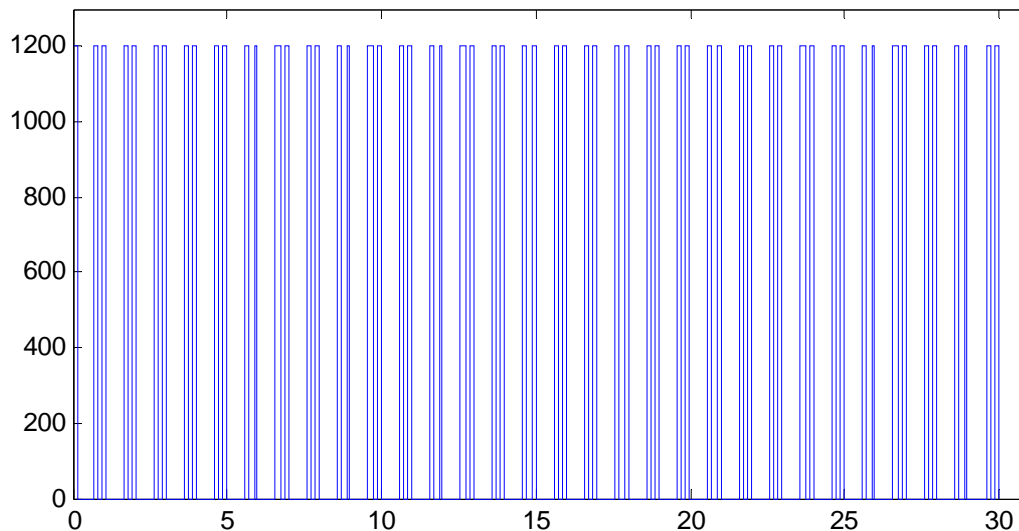


Figure6. Consommation de PAC

La consommation d'électricité totale (E_C) est de 8.2×10^8 J, soit 230kWh. Le système de plancher chauffant fournit 19.2×10^8 J (E_p) de chaleur vers le bâtiment, soit 530KWh. Le COP (coefficient de performance) du système global est d'environ à 2.34.

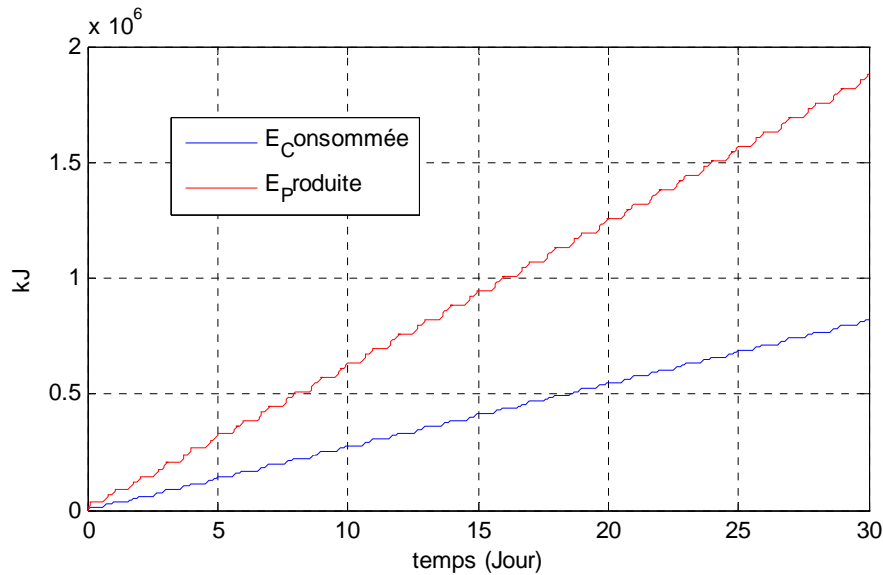


Figure7. Consommation et production du système énergétique

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Dans cet article, on a présenté un résultat de simulation d'un système thermique de bâtiment avec ses composants qui sont :

- Une Pompe à chaleur
- Un plancher chauffant
- Un capteur solaire
- Un ballon de stockage
- Un réseau thermique de bâtiment déterminé.

Le plancher chauffant joue un rôle très important dans le système. Il réduit la fréquence de démarrage/arrêt de la PAC et donc de sa consommation d'électricité pour la raison suivante :

L'inertie du plancher permet de maintenir une température intérieure plus stable et de réduire ainsi la fréquence de démarrage et d'arrêt. Les périodes pénalisantes énergétiquement sur une PAC sont les périodes de mise en régime, dites transitoires, ce sont les périodes de démarrage et d'arrêt. Le fait de réduire le nombre de ces phases augmente l'efficacité globale du fonctionnement sur une période donnée et agit significativement sur la performance thermique du système.

Les prochains travaux s'intéresseront aux aspects suivants:

- 1) On ajoutera une autre source : un modèle géothermique sera implanté dans le système.
- 2) On travaillera sur le choix de la source à l'entrée de la PAC en fonction de température sortie (capteur solaire, capteur géothermique...)
- 3) On créera les modèles connexes permettant d'évaluer la production de CO₂, la consommation d'énergie et sa valorisation. etc....
- 4) On optimisera le système pour attendre une meilleure efficacité possible.

Lorsque tous les éléments du système auront été développés, on pourra mettre en place des algorithmes qui permettront de l'optimiser en réduisant la consommation d'électricité et la production du CO₂ sans sacrifier la demande de confort.

Nomenclature:

A :	Surface (m ²)
A_m :	Amplitude
C :	Capacité thermique (J/K)
C_p :	Capacité thermique massique (J/kgK)
E :	Rayonnement solaire (W/m ²)
E_{hp} :	Puissance électrique de pompe à chaleur
k_1 :	Efficacité de la PAC mesurée (=0.4)
k_2 :	Surface de capteur solaire (m ²)
k_3 :	Coefficient de capteur solaire (=125W/K)
\dot{m} :	Flux massique (kg/s)
M :	Masse (kg)
P :	Facteur de fenêtre (0.8)
Q :	Flux thermique (W)
T :	Température (°C)
u :	Vitesse (m/s)
U :	Coefficient de transfert thermique (W/m ² K)
ν :	Viscosité dynamique (m ² /s)

Indices:

b :	ballon de stockage
c :	plafond
con :	condenseur
e :	équipements intérieur
eva :	évaporateur
f :	plancher
g :	fenêtre
i :	intérieur
in :	entrée
m :	valeur moyenne
o :	extérieur
out :	sortie
pic :	valeur pic
s :	solaire
w :	mur

BIBLIOGRAPHIE

- Athienitis, A.K., Stylianou, M. and Shou, J., *A Methodology for Building Thermal Dynamics Studies and Control Applications*, ASHRAE Transactions, Vol. 96, Part 2, pp. 839-848, 1990
- A.W.M. (Jos) van Schijndel and M.H. (Martin) de Wit, *Advanced simulation of building system and control with Simulink*, Eighth International IBPSA Conference Eindhoven, Netherlands, August 11-14, 2003
- C. Marvillet, *Les équipements techniques pour le bâtiment*, Rapport de l'INES, AG DTS, 19/01/ 2007
- Elias Kinab, Amélie Fau, Dominique Marchio, and Philippe Rivière, *Model of a Reversible Heat Pump for Part Load Energy Based Optimization Design*, Ecole des Mines de Paris, Center for Energy and Processes
- Jong, J. de, A.W.M. van Schijndel and C.E.E. Pernot, *Evaluation of a low temperature energy roof and heat pump combination*, Int. Building Physics Conference Eindhoven, 18-21 Sept. 2000
- J. V. C. Vargas, *Simulation in transient regime of a heat pump with closed-loop and on-off control* Int. J. Refrig. Vol. 18, No. 4, pp. 235-243, 1995
- Lorenz, F., Masy, G., *Méthode d'évaluation de l'économie d'énergie apportée par l'intermittence de chauffage dans les bâtiments. Traitement par différences finies d'un modèle à deux constantes de temps.* (1982) Faculté de Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgium
- Manohar R. Kulkarni, Feng Hong, *Energy optimal control of a residential space-conditioning system based on sensible heat transfer modeling*, Building and Environment 39(2004) 31-38
- Nicolas FLACH-MALASPINA, *Conception globale d'une pompe à chaleur air/eau inversible à puissance variable pour le secteur résidentiel*, Mémoire de thèse 2004, Ecole mine de Paris
- Shengwei Wang, *Dynamic simulation evaluation of building VAV air-conditioning system and of EMCS on-line control strategies*, Building and Environment 34 (1999) 681-705
- Welsby. et al., *Steady and dynamic-state simulations of heat pumps*, Applied Energy, 31 (1988) 239-262