

# Analyse exergetique d'un système solaire combiné

Guillaume Deckert<sup>1</sup>, Radu Zmeureanu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CETHIL. – Centre de Thermique de Lyon  
INSA Lyon 69621 Villeurbanne, France  
[guillaume.deckert@insa-lyon.fr](mailto:guillaume.deckert@insa-lyon.fr)

<sup>2</sup> Département du génie du bâtiment et des génies civil et de l'environnement  
Université Concordia, Montréal, Canada  
[zmeur@bcee.concordia.ca](mailto:zmeur@bcee.concordia.ca)

---

**RESUME.** La plupart des études sur la performance des systèmes énergétiques installés dans les bâtiments utilisent le rendement énergétique comme le critère de performance. Cette étude a pour but d'estimer le rendement exergetique, selon la deuxième loi de la thermodynamique, d'un système solaire combiné, qui est conçu pour chauffer une maison à faible consommation énergétique située à Montréal. Le modèle mathématique a été écrit et résolu dans l'environnement SEI (Solveur d'Equations pour l'Ingénierie). On constate la forte différence, pour ce cas d'étude, entre le rendement exergetique annuel du système solaire combiné, de 0,11, et le rendement énergétique de 0,80-0,89.

**MOTS-CLÉS :** *exergie, énergie, solaire, système combiné*

---

**ABSTRACT.** Most studies use the energy efficiency as the criterion of performance of energy systems installed in buildings. This study presents the estimation of exergy efficiency, based on the second law of thermodynamics, of a solar combisystem, designed to heat a low energy demand house located in Montreal. The mathematical model was developed and solved by using the Engineering Equation Solver (EES) program. There is a large difference between the annual exergy efficiency of the solar combisystem, of 0.11, and the annual energy efficiency of 0.80-0.89.

**KEYWORDS :** *exergy, energy, solar, combisystem,*

---

## 1. INTRODUCTION

L'utilisation de capteurs solaires pour chauffer l'eau chaude sanitaire (ECS) est une alternative mature. Toutefois une utilisation plus large est de plus en plus envisagée surtout avec des systèmes solaires combinés, qui fournissent de la chaleur pour l'eau chaude sanitaire et pour le chauffage des locaux. Ces systèmes combinés sont bien plus complexes, demandant plus d'attention dans la phase de conception et des systèmes de régulation automatique adéquats pour obtenir la performance souhaitée pendant le fonctionnement.

L'analyse énergétique est l'outil le plus commun pour l'évaluation de la performance de ce type de systèmes. Néanmoins, cette analyse ne tient pas compte de la qualité des sources d'énergie utilisées ainsi que de la perte de qualité dans ces systèmes. Dans ce but, cette communication utilise l'analyse exergetique comme outil de travail.

## 2. REVUE DE LITTÉRATURE

L'agence internationale de l'énergie (IEA) a développé, au sein de son programme SHC (solar heating and cooling), des groupes de travaux au niveau européen pour évaluer les différentes technologies solaires. Pour notre étude on retiendra principalement les tâches 26 et 32 respectivement concernant les systèmes solaires combinés et les différentes technologies permettant le stockage de la chaleur.

### 2.1 TACHE 26 : SYSTEMES SOLAIRES COMBINES

La tâche 26 s'est attelée au niveau européen à recenser et analyser différents systèmes solaires combinés. Au total 20 systèmes solaires de ce type ont été étudiés. Suite à cette étude, des outils ont été mis en place pour évaluer de manière simple la performance des systèmes combinés. Mais néanmoins on peut noter qu'aucune analyse exergétique n'a pas été entreprise sur ces systèmes.

Pour notre étude, le système #8 de la tâche 26 est retenu comme le cas de base pour évaluer la validité du modèle développé. L'eau destinée au chauffage de l'habitat est stockée dans le ballon d'eau. L'eau chaude sanitaire est chauffée principalement à l'aide des capteurs solaires, en passant par un échangeur de chaleur installé à l'intérieur du ballon de stockage. Une source d'énergie d'appoint est utilisée quand la température d'alimentation descend au-dessous du point de consigne.

Pratiquement la plus part des paramètres utilisés lors de la modélisation effectuée par les travaux de la tâche 26 sont repris dans cette étude. Toutefois, certains paramètres ont été modifiés :

- la pompe de circulation de l'eau chaude pour le plancher chauffant est à débit variable ;
- la pompe de circulation du mélange glycol-eau pour le circuit du collecteur solaire est à débit constant ;
- un appoint électrique de 10 kW est installé dans le ballon de stockage à la place du brûleur de gaz naturel de 20 kW ; un deuxième appoint électrique est installé sur la sortie de l'ECS ;
- on utilise des collecteurs sous vide VITOSOL produit by Viessman au lieu de capteurs solaires plans ;
- le piquage d'eau chaude nécessaire pour le plancher chauffant s'effectue au sommet du ballon de stockage et son retour au bas du ballon.

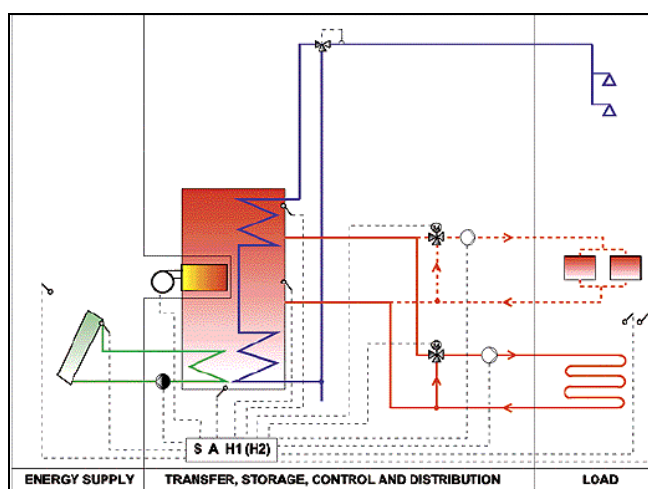


Figure 1 : Système #8 de la tâche 26 de l'AIE-SHC

## 2.2 ANALYSE EXERGETIQUE DES SYSTEMES DE CHAUFFAGE ET CLIMATISATION

Une des faiblesses majeures de la modélisation de la performance énergétique des bâtiments est non utilisation de la 2<sup>ème</sup> loi de la thermodynamique (Rosen et al. (2001)). Leskinen et Simonson (2000) ont montré que les besoins en chauffage, nécessitant une température d'alimentation basse, peuvent être satisfaits par de sources renouvelables telles que la géothermie ou l'énergie solaire. Alpuche et al. (2004) ont évalué le rendement exergetique d'une unité de climatisation zonale à 1.8-6.3%. Utlu et Hepbasli (2006) ont estimé à 6.39% le rendement exergetique de combustibles utilisés pour le chauffage des maisons en Turquie. Ils ont aussi compilé les résultats d'autres études montrant que le rendement exergetique national pour les secteurs résidentiel et commercial est de 8.7-9.7% (Arabie Saoudite), 3% (Japon), 2% (Italie), 8% (Finlande), 10% (Suède), 14% (USA) et 15% (Canada). Zmeureanu et Wu (2006) ont simulé la performance de 25 systèmes de chauffages d'une maison éco-efficente située à Montréal. L'étude a montré des Coefficients de Performance (COP) annuels entre 0.7 et 1.5 comparés à des rendements exergetiques autour de 5 à 27%. Le meilleur système est celui utilisant des planchers chauffants avec pompe à chaleur comme source principale de chauffage, avec un système de ventilation utilisant un ventilateur récupérateur de chaleur et un puits canadien. Dans ce cas, le COP du système est de 1.46 et le rendement exergetique est de 26.8%. On note cependant l'absence d'un système utilisant l'énergie solaire dans cette étude. De ce fait, cette communication est un prolongement de l'étude précédent.

## 3. DEVELOPPEMENT DU MODELE MATHEMATIQUE

### 3.1. ENVIRONNEMENT DE SIMULATION

Le modèle mathématique a été développé en utilisant une approche quasi-stationnaire (avec un pas de temps de 10 minutes) dans le programme Solveur d'Equations pour l'Ingénierie (Klein 2003). SEI est un environnement qui est pertinent pour le développement d'un tel modèle mathématique, car il a été développé pour des applications en thermodynamique.

SEI est un environnement de programmation car il n'existe pas vraiment de composants ou de systèmes prédéfinis comme on peut en trouver dans un programme tel que TRNSYS ou EnergyPlus. L'utilisateur doit écrire l'ensemble des équations du modèle mathématique en utilisant un langage informatique proche de celui utilisé dans des environnements tels que ceux de Fortran et de C++. Ensuite SEI identifie et groupe automatiquement les équations pour les résoudre simultanément. Cela pourrait poser des problèmes pour résoudre des systèmes trop fortement non linéaires.

A cause de la limitation dans le nombre de pas de temps possible, l'étude se résume au 6 mois de période de chauffage légal du Québec (Novembre à Avril). On modélise seulement 10 jours de chaque mois.

### 3.2. DONNEES

Les données utilisées sont les charges horaires de chauffage  $\dot{Q}_L$  (W) d'une maison à Montréal, obtenues d'une autre étude (Kassab et al, 2003). De plus, on donne la température extérieure et l'ensoleillement direct et diffus à Montréal en base horaire sur une surface horizontale. Le débit journalier d'eau chaude sanitaire (ECS) est de 200 l et la distribution journalière est modélisée grâce à un logiciel utilisé dans la tâche 26. La température de consigne de l'ECS est fixée à 55°C et celle du réseau provient des mesures prises dans l'aqueduc fournissant Montréal en eau courante.

### 3.3. MODELISATION

Les équipements composant le système sont modélisés séparément, en utilisant les bilans thermiques et exergetiques : (i) les collecteurs solaires et la boucle fermée dans laquelle circule le mélange glycol/eau ; (ii) le plancher radiant et sa boucle d'alimentation passant au travers du ballon de stockage ; (iii) la boucle ouverte pour l'ECS ; et (iv) le ballon de stockage.

#### 3.3.1 Capteurs solaires

Le circuit reliant les capteurs solaires et l'échangeur de chaleur du ballon de stockage est montré dans la figure 2 avec les notations utilisées dans les calculs.

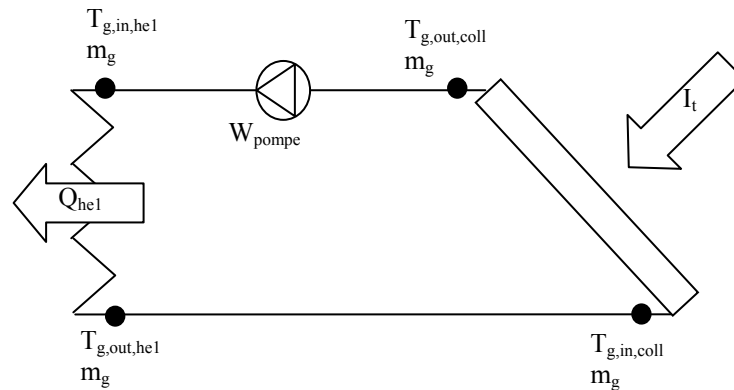


Figure 2 : Schéma du circuit des capteurs solaires et l'échangeur de chaleur du ballon de stockage

Le rendement thermique du collecteur VITOSOL (Viessman 2006) est estimé par la formule suivante :

$$\eta_{coll} = \eta_{optic} - k_1 \cdot \frac{\Delta T}{I_t} - k_2 \cdot \frac{\Delta T^2}{I_t} \quad [1]$$

où :

$\eta_{optic} = 0.838$  ;  $k_1 = 1.18 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  ;  $k_2 = 0.0066 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^2$  ;  $I_t$  est le rayonnement solaire incident ( $\text{W/m}^2$ ) ;  $\Delta T = T_{g,ave,coll} - T_{a,o}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) ;  $T_g$  est la température du glycol ( $^{\circ}\text{C}$ ) ;  $T_{a,o}$ , est la température sèche de l'air extérieur ( $^{\circ}\text{C}$ ) et

$$T_{g,ave,coll} = \frac{T_{g,in,coll} + T_{g,out,coll}}{2} \quad [2]$$

L'énergie collectée par le capteur solaire est calculé avec la formule suivante :

$$\dot{Q}_{coll} = A_{coll} \cdot \eta_{coll} \cdot I_T = \dot{m}_g \cdot (h_g(T_{g,out,coll}) - h_g(T_{g,in,coll})) \quad [3]$$

La chaleur spécifique du mélange glycol-eau est calculée avec la formule 4, qui provient du TYPE 60 du TRNSYS :

$$c_p^g(T, pct) = a + b \cdot TK \quad (\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})) \quad [4]$$

où :

$a = 3.9189 - 0.035267 \cdot \gamma$  ( $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ) ;  $b = 0.0014555 + 4.8423 \cdot 10^{-5} \cdot \gamma$  ( $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}^2)$ ) ;  $TK$  est la température du glycole (K) et  $\gamma$  est la concentration du glycol, égale à 0,4.

L'enthalpie et l'entropie du glycol sont calculées avec les formules 5 :

$$h_g(T) = c_p^g(T) \cdot T \quad \text{et} \quad s_g(T) = c_p^g(T) \cdot \ln(TK) \quad [5]$$

L'enthalpie du glycol à la sortie du collecteur est calculée avec la formule suivante :

$$h_g(T_{g,out, coll}) = h_g(T_{g,in, coll}) + \frac{\dot{Q}_{coll}}{\dot{m}_g} \quad [6]$$

où :  $\dot{m}_g$  est le débit massique du glycol (kg/s).

Le transfert de chaleur dans l'échangeur installé dans le ballon de stockage est donné par la formule 7 :

$$\dot{Q}_{he1} = \dot{m}_g \cdot (h_g(T_{g,in, he1}) - h_g(T_{g,out, he1})) \quad [7]$$

Le rendement exergetique du collecteur solaire est calculé avec la formule 8. Deux autres définitions ont été également utilisées dans l'étude et les résultats ont été comparés.

$$(\eta_{ex})_{coll} = \frac{\dot{X}_{g,out, coll} - \dot{X}_{g,in, coll}}{(\dot{X}_{g,out, coll})_{max} - \dot{X}_{g,in, coll}} \quad [8]$$

où :

$$\dot{X}_{g,out, coll} = \dot{m}_g \cdot [h_g(T_{g,out, coll}) - TK_{a,o} \cdot s_g(T_{g,out, coll})] \quad [9]$$

$$\dot{X}_{g,in, coll} = \dot{m}_g \cdot [h_g(T_{g,in, coll}) - TK_{a,o} \cdot s_g(T_{g,in, coll})] \quad [10]$$

$$(\dot{X}_{g,out, coll})_{max} = \dot{m}_g \cdot [h_g(T_{g,out, coll, max}) - TK_{a,o} \cdot s_g(T_{g,out, coll, max})] \quad [11]$$

### 3.3.2 Ballon de stockage

Le volume d'eau à l'intérieur du ballon est divisé en trois couches homogènes afin de considérer, d'une manière simplifiée, la stratification thermique. Le bilan thermique de chaque couche  $k$  ( $k=1$  à  $3$ ), prenant en compte les différents flux de matière et d'énergie, permet d'estimer la température  $T_k$  (Figure 3). Par exemple, pour la couche 1 on peut écrire :

$$m_1 \cdot c_p^w \cdot \frac{dT_1}{dt} = \dot{Q}_{cond, 2 \rightarrow 1} - \dot{Q}_{loss, 1} + \dot{E}_{sup} - \dot{Q}_{he3} + \dot{m}_{w, floor} \cdot c_p^w \cdot (T_2 - T_{w, out, tank}) \quad [12]$$

où :

$\dot{Q}_{conv, 2 \rightarrow 1}$  est le débit de chaleur par conduction entre les couches 1 et 2 ;  $\dot{Q}_{loss, 1}$  est la perte de chaleur à travers la paroi du ballon ;  $\dot{E}_{sup}$  est le débit de chaleur fourni par l'appoint électrique ;  $\dot{Q}_{he3}$  est le débit de chaleur vers l'échangeur de l'ECS ;  $m_1$  est la masse d'eau de la couche 1 ;  $\dot{m}_{w, floor}$  est le débit d'eau utilisé pour le chauffage de la maison, qui est extraite de la 1<sup>ère</sup> couche ; et  $T_{w, out, tank} = T_1$ .

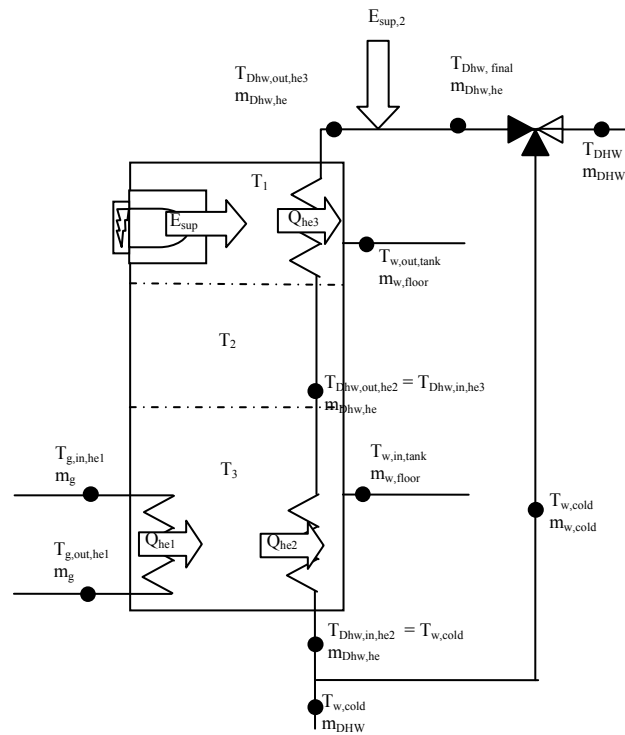


Figure 3 : Schéma du ballon de stockage d'eau chaude avec échangeurs de chaleur, un pour la boucle solaire et l'autre pour l'ECS.

Le rendement exergetique du ballon de stockage est calculé avec la formule suivante :

$$(\eta_{ex})_{tank} = \frac{\dot{X}_{w,out,tank} - \dot{X}_{w,in,tank} + \dot{X}_{Dhw,out,he3} - \dot{X}_{Dhw,in,he2}}{\dot{X}_{g,in,he1} - \dot{X}_{g,out,he1} + E_{sup}} \quad [13]$$

Le rendement exergetique du plancher chauffant est calculé avec la formule suivante :

$$(\eta_{ex})_{floor} = \frac{\dot{Q}_L \cdot (1 - TK_{a,o} / TK_{int})}{\dot{X}_{w,in,floor} - \dot{X}_{w,out,floor}} \quad [14]$$

#### 4. RESULTATS

Les résultats portent sur l'analyse du rendement énergétique annuel du système solaire combiné :

$$(\eta_{en})_{global} = \frac{\dot{Q}_L + \dot{m}_{Dhw} \cdot c_p^w \cdot (T_{Dhw,final} - T_{Dhw,cold})}{E_{sup} + E_{sup,2} + I_{t,used}} \quad [15]$$

et du rendement exergetique annuel :

$$(\eta_{ex})_{total} = \frac{\dot{Q}_L \cdot (1 - TK_{a,o} / TK_{int}) + \dot{X}_{Dhw,out,he3} - \dot{X}_{Dhw,in,he2}}{(\dot{X}_{g,out,coll})_{max} - \dot{X}_{g,in,coll} + E_{sup} + E_{sup,2}} \quad [16]$$

Le système solaire combiné contient 10 m<sup>2</sup> de capteurs solaires, dans le cas de base (en lettre gros dans les tableaux 1 à 3), en fonctionnement pour les mois de novembre à mars et de 5 m<sup>2</sup> pour le mois d'avril, avec une inclinaison de 60° et un débit de mélange glycol/eau de 200 kg/h (20 kg/(h·m<sup>2</sup>)) dans la boucle solaire. L'analyse de sensibilité des rendements énergétique et exergetique, par rapport à

certaines variables de conception, est présentée dans les tableaux 1 à 3. On a fait varier la surface des capteurs de 6 m<sup>2</sup> à 14 m<sup>2</sup> par pas de 2 m<sup>2</sup> pour les mois de novembre à mars et avec la moitié en surface pour le mois d'avril, excepté dans le cas des 6 m<sup>2</sup> (Tableau 1). L'inclinaison des capteurs a été variée par pas de 5° et le débit de glycol par pas de 5 (kg/(h·m<sup>2</sup>)).

Tableau 1 : Analyse de sensibilité du rendement par rapport à la surface des capteurs solaires.

Surface (m <sup>2</sup> )	Couverture solaire (%)	$\eta_{en,global}$ (-)	$\eta_{ex,total}$ (-)	$\eta_{ex,collecteur}$ (-)	$\eta_{ex,ballon}$ (-)	$\eta_{ex,plancher}$ (-)	$\eta_{ex,ECS}$ (-)
6	13,6	0,89	0,11	0,60	0,15	0,71	0,14
8	15,3	0,88	0,11	0,48	0,15	0,71	0,14
<b>10</b>	<b>18,7</b>	<b>0,86</b>	<b>0,11</b>	<b>0,47</b>	<b>0,16</b>	<b>0,71</b>	<b>0,14</b>
12	21,6	0,83	0,11	0,46	0,16	0,70	0,14
14	23,9	0,80	0,11	0,46	0,17	0,70	0,14

Tableau 2 : Analyse de sensibilité du rendement par rapport à l'inclinaison des capteurs solaires.

Inclinaison (°)	Couverture solaire (%)	$\eta_{en,global}$ (-)	$\eta_{ex,total}$ (-)	$\eta_{ex,collecteur}$ (-)	$\eta_{ex,ballon}$ (-)	$\eta_{ex,plancher}$ (-)	$\eta_{ex,ECS}$ (-)
35	20,5	0,85	0,11	0,48	0,16	0,71	0,14
40	20,5	0,85	0,11	0,48	0,16	0,71	0,14
45	20,1	0,85	0,11	0,48	0,16	0,71	0,14
50	19,8	0,85	0,11	0,48	0,16	0,71	0,14
55	19,4	0,85	0,11	0,47	0,16	0,71	0,14
<b>60</b>	<b>18,7</b>	<b>0,86</b>	<b>0,11</b>	<b>0,47</b>	<b>0,16</b>	<b>0,71</b>	<b>0,14</b>

Tableau 3 : Analyse de sensibilité du rendement par rapport au débit de glycol

Débit de glycol (kg/(h·m <sup>2</sup> ))	Couverture solaire (%)	$\eta_{en,global}$ (-)	$\eta_{ex,total}$ (-)	$\eta_{ex,collecteur}$ (-)	$\eta_{ex,ballon}$ (-)	$\eta_{ex,plancher}$ (-)	$\eta_{ex,ECS}$ (-)
10	18,5	0,85	0,11	0,45	0,15	0,71	0,14
15	18,7	0,86	0,11	0,46	0,15	0,71	0,14
<b>20</b>	<b>18,7</b>	<b>0,86</b>	<b>0,11</b>	<b>0,47</b>	<b>0,16</b>	<b>0,71</b>	<b>0,14</b>
25	18,6	0,85	0,11	0,48	0,15	0,71	0,14
30	18,6	0,85	0,11	0,49	0,15	0,71	0,14

La variation de trois paramètres de conception (la surface et l'inclinaison des capteurs solaires, et le débit de glycol dans la boucle solaire) n'apporte pas de changements dans le rendement exergetique annuel du cas de base, qui reste à 0,11. Le rendement énergétique annuel du système a une variation légère (entre 0,80 et 0,89), autour du rendement du cas de base (égal à 0,86). La variation de la surface des capteurs solaires a le plus grand impact sur les deux rendements globaux annuels. Le rendement exergetique du plancher chauffant ( $\eta_{ex,plancher}=0,70-0,71$ ), du ballon de stockage ( $\eta_{ex,ballon}=0,15-0,17$ ) et du système ECS ( $\eta_{ex,ECS}=0,14$ ) ne sont pas influencés par la variation de trois paramètres de conception.

## 5. CONCLUSIONS

Pour conclure on peut donc voir que les résultats montrent un rendement exergetique du même ordre de grandeur que les études précédentes, malgré l'utilisation de l'énergie solaire pour chauffer

l'eau de chauffage et l'ECS. On s'attendait à un rendement exergetique supérieur. Le faible rendement exergetique est due (1) aux différences de températures entre le circuit de glycol, le circuit de chauffage, le circuit de l'ECS et les trois couches d'eau du ballon de stockage ; (2) au mélange dans le système d'ECS et (3) à la performance du capteur solaire. On constate la forte différence, pour ce cas d'étude, entre le rendement exergetique annuel du système, de 0,11, et le rendement énergetique annuel de 0,80-0,89.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- Alpuche MG, Heard C, Best C, Rojas J. (2004). Exergy analysis of air cooling systems in buildings in hot humid climates. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, p. 507-517.
- Bony J., Pittet J. (2002). *Appendix 4: Generic system #8: Space heating store with double load-side heat exchanger for dhw*. Task 26, Subtask C, IEA-SHC, 32 pages, disponible sur : [http://www.iea-shc.org/outputs/task26/C\\_App4\\_System8.pdf](http://www.iea-shc.org/outputs/task26/C_App4_System8.pdf) (dernière consultation le 22-04-2008).
- Duffie J. (2006) *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3ème édition. John Wiley & Sons.
- Kassab, M., Zmeureanu, R., Derome, D. (2003). Life-cycle analysis of improvements to an existing energy-efficient house in Montreal. *Architectural Science Review*, Vol. 46, No. 4, p.341-352.
- Klein S.A. (2003). *EES-Engineering Equation Solver, Professional Version. F-Chart Software*, Middleton, WI.
- Leskinen M, Simonson C. (2000). Annex 37: Low exergy systems for heating and cooling of buildings. *IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems Technical Presentations*, Tokio, November 8, 2000, [http://www.vtt.fi/rte/projects/annex37/technical%20day%20report\\_tokio.pdf](http://www.vtt.fi/rte/projects/annex37/technical%20day%20report_tokio.pdf).
- Rosen MA, Leong WH, Le MN. (2001). Modeling and analysis of building systems that integrate cogeneration and district heating and cooling. *Proceedings of eSim 2001 Conference*, Ottawa, Canada, 187-194.
- Utlu Z, Hepbasli A. (2006). Estimating the energy and exergy utilization efficiencies for the residential-commercial sector: an application. *Energy Policy*, 34: 1097-1105.
- Viessmann, (2006). *Notice pour l'étude*. Vitosol, Viessmann, 64 pages, disponible sur : [http://www.viessmann.be/fr/products/Solar-Systeme/Vitosol300.ProductTeaserDownloadlist.Single.downloadlistitem.87601.FileRef.File.tmp/PLA\\_Vitosol.pdf](http://www.viessmann.be/fr/products/Solar-Systeme/Vitosol300.ProductTeaserDownloadlist.Single.downloadlistitem.87601.FileRef.File.tmp/PLA_Vitosol.pdf) (dernière consultation le 22-04-2008).
- Zmeureanu, R., Wu, X.Y., (2006). Energy and exergy performance of residential heating systems with separate mechanical ventilation system. *Energy, The International Journal*, Vol. 32/3, pp.187-195.
- Weiss W. (2004). *Solar Heating Systems for Houses: A Design Handbook for Solar Combisystems*. Earthscan Publications Ltd.