

Optimisation des performances énergétiques, économiques et environnementales des installations de production d'eau chaude solaire individuelles

Yu Bai, Gilles Fraise, Lingai Luo et Bernard Souyri

Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement,
Campus scientifique Savoie Technolac, 73376 Le Bourget du lac
Yu.bai@univ-savoie.fr

Résumé - Ce travail porte sur l'expérimentation, la simulation et l'optimisation du comportement d'une installation de chauffe-eau solaire individuel (CESI) en fonction des différents modes de gestion. Les résultats expérimentaux de la première partie ont permis de valider les modèles numériques, notamment pour les faibles débits. La comparaison numérique des performances énergétiques des différents types de CESI a été étudiée sous TRNSYS. Enfin, l'optimisation des performances énergétique, économique et environnementale d'un système fonctionnant en tout ou rien a été réalisée grâce au logiciel GenOpt (interface TrnOpt).

Mots clés : Chauffe-eau solaire individuel (CESI), expérimentation, simulation, optimisation

Nomenclature

		<i>Indices et exposants</i>
a, b	paramètres caractéristiques du circulateur	
CGA	Coût Global Actualisé, €	bb bas du ballon cap
D	dépense annuelle, €	cap capteur
EF	Energie finale, kWh	$cons$ consigne
EP	Energie primaire, kWh	exp expérimentation
Et	eclairement, W/m ²	ec entrée de capteur
I	courant de PV, A	ee entrée d'échangeur
I_0	investissement d'année 0, €	hb haut du ballon
Q	débit	se sortie d'échangeur
N	nombre d'année de l'installation	sc sortie de capteur
T	température, °C	$simu$ simulation
V	tension de PV, V	

1. Introduction

L'utilisation de l'énergie solaire pour chauffer l'eau chaude sanitaire est très judicieuse du fait des besoins constants tout au long de l'année. Les installations conventionnelles de CESI sont a priori performantes mais les consommations énergétiques (appoint, circulateur et régulateur) sont relativement élevées, notamment dans la perspective de bâtiments à très faibles besoins. Il est certainement encore possible, grâce à l'utilisation d'outils d'optimisation, d'améliorer sensiblement les performances des différents types de CESI : gestion du débit en tout ou rien (on-off), débit variable et au fil du soleil (couplage direct du circulateur avec un module photovoltaïque : CESI-PV). Différentes études ont été réalisées sur l'optimisation économique de CESI classiques [1-2] ou gérés au fil du soleil [3-5], ainsi que de systèmes de pompage photovoltaïque d'eau [6]. Ces études sont essentiellement numériques ; elles mériteraient d'être complétées par des validations expérimentales.

C'est pourquoi, un banc expérimental a été réalisé à l'Institut National de l'Energie Solaire (INES). Les données expérimentales ont permis de valider les modèles numériques utilisés (capteur, échangeur, ballon et canalisations) sur une plage de débits couvrant les faibles débits. Ensuite, un modèle de circulateur spécifique a été développé sous TRNSYS de façon à étudier l'alimentation directe du circulateur (fonctionnement en courant continu) par un module

photovoltaïque. Une étude numérique a ensuite permis de comparer les performances énergétiques de différents types: régulation classique en tout ou rien, débit variable et le CESI-PV. Enfin, plusieurs caractéristiques d'un CESI fonctionnant en tout ou rien ont été optimisées à partir des critères énergétiques (équivalent au critère environnemental) et économique.

2. Etude expérimentale et numérique d'un CESI

2.1. Description du banc expérimental

Le banc expérimental (figure 1) du CESI réalisé à l'INES nous a permis d'étudier les performances dans différentes configurations. L'installation est constituée de deux champs de capteurs (2 et 4m², CLIPSOL) connectés en parallèle. Le ballon de stockage, d'un volume de 400 litres, présente un échangeur interne. Grâce au système d'acquisition NAPAC (assurant aussi la commande du CESI) et à l'interchangeabilité du circulateur, il est possible d'étudier une installation CESI on-off, à débit variable ou CESI-PV. Les canalisations en cuivre présentent 22 mm d'isolant. Les mesures des températures sont réalisées à l'aide de sondes PT1000 et la mesure de débit avec trois compteurs à impulsions. Une station météorologique détermine notamment l'ensoleillement dans le plan du capteur.

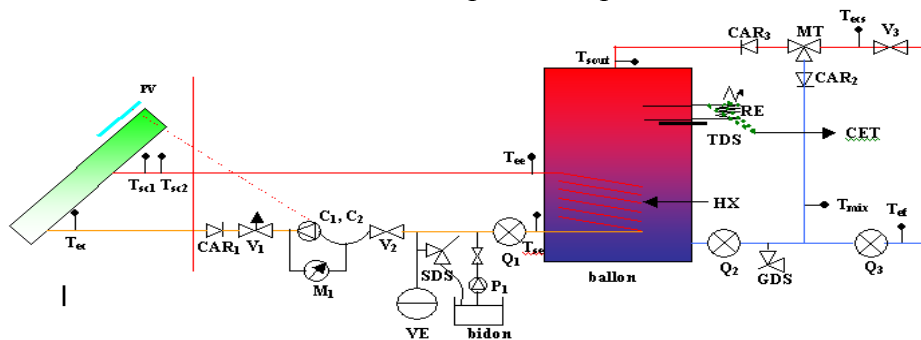


Figure 1 : schéma principe de l'installation

2.2. Modèles numériques des composants

Le logiciel TRNSYS [7] est utilisé pour modéliser le système. Il est basé sur la connexion de modèles (des sous-programmes nommés « types ») relatifs à chacun des composants (ballon, régulation...). Le « type102 » développé au sein du laboratoire a été utilisé dans nos études numériques [8]. Son intérêt est de prendre en compte à la fois le comportement dynamique du capteur et ses caractéristiques thermo-physiques. Le « type140 » est utilisé pour la modélisation du ballon [9]. Ce modèle détermine le coefficient d'échange du serpentin en fonction notamment du débit du fluide caloporteur.

2.3. Comparaison des résultats expérimentaux et numériques

Les données expérimentales nous ont permis de valider les modèles numériques utilisés : capteur, échangeur, ballon et canalisations. Par la suite, nous allons analyser les performances de CESI présentant un débit variable (CESI-PV et régulation à débit variable). C'est la raison pour laquelle, nous avons fait varier le débit entre 17 et 56 l/h.m² pendant les mesures. D'après la figure 2, nous constatons une bonne concordance des températures en sortie de capteur (6 m²) entre les mesures (Tsc-exp) et les valeurs simulées (Tsc-simu). L'écart le plus important est obtenu pour les faibles débits (au maximum 2 °C, soit un écart relatif de 6%).

Concernant la comparaison des températures du fluide à la sortie de l'échangeur Tse (figure 3), les écarts sont moins importants à haut débit (débit supérieur à 50 l/h.m²). Lorsque le débit

est plus faible, on constate des écarts plus importants sur les températures ($T_{se-simu} - T_{se-exp}$) jusqu'à 2.5 °C. Les températures expérimentales en haut du ballon T_{hb} et en bas du ballon T_{bb} présentent la même évolution (aucun puisage et appoint électrique arrêté).

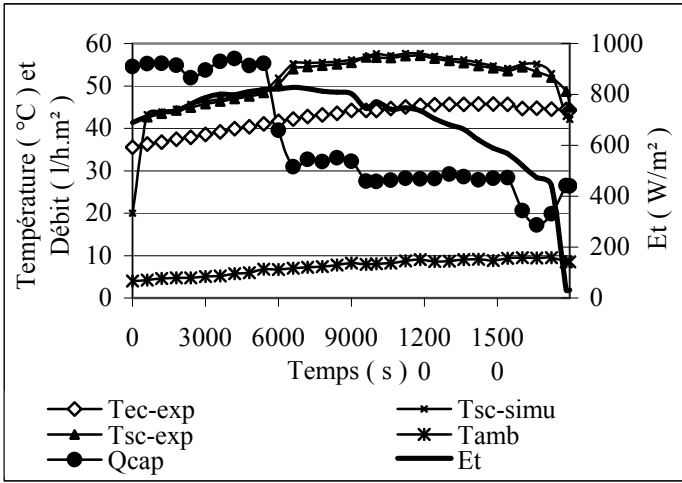


Figure 2 : Comparaison expérimentale et numérique relative au capteur (débit par unité de surface de capteur)

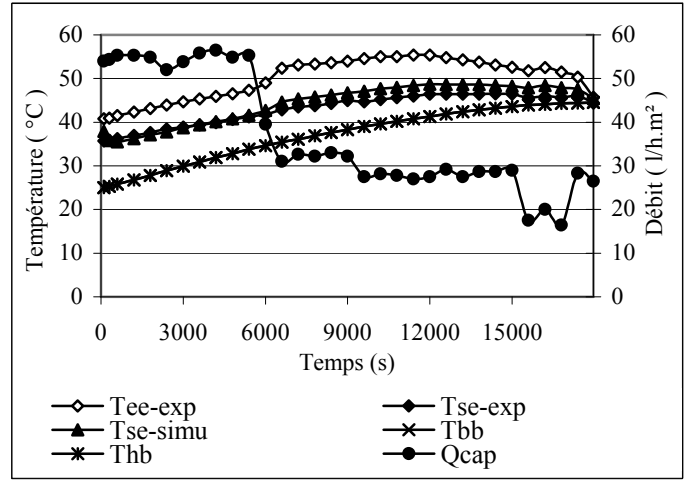


Figure 3 : Comparaison expérimentale et numérique relative à l'échangeur (débit par unité de surface de capteur)

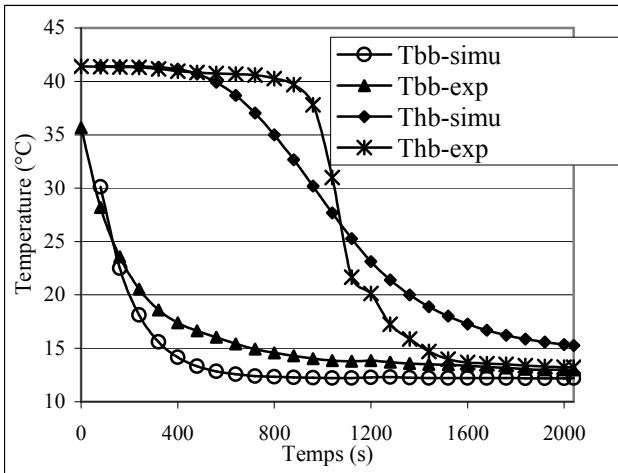


Figure 4 : Comparaison expérimentale et numérique relative au ballon (période 1)

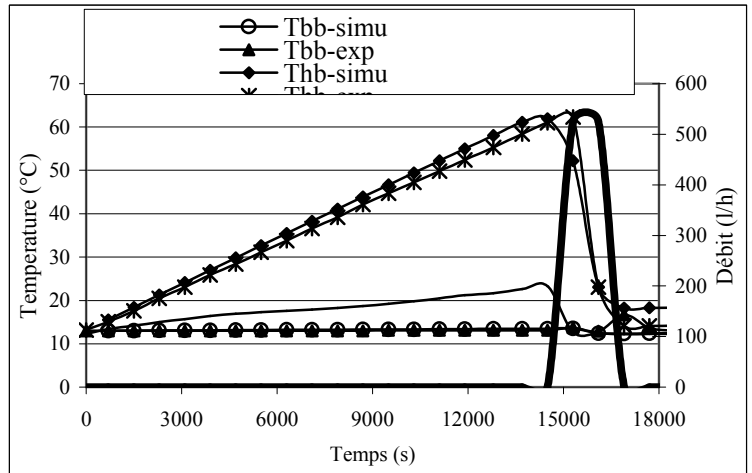


Figure 5 : Comparaison expérimentale et numérique relative au ballon (période 2)

Les figure 4 et 5 montrent la comparaison des températures au sein du ballon au cours de deux périodes distinctes. Le débit circulant dans l'échangeur solaire est dans ce cas nul. Concernant la première période (figure 4), les températures initiales en haut du ballon T_{hb-exp} (hauteur relative : 0.77) et en bas du ballon T_{bb-exp} (hauteur relative : 0.035) valent respectivement 41.5 °C et 35 °C. Un puisage constant de 17.5 l/min est réalisé tout au long de la mesure. A la fin du soutirage, la température dans le ballon devient uniforme (13 °C). Nous pouvons constater que les évolutions en haut et en bas du ballon entre les données expérimentales et les simulations présentent une similitude évidente, même si des écarts de température relativement importants sont constatés en partie supérieure du ballon. Ces écarts sont néanmoins logiques du fait de la nature des modèles utilisés (type 140) qui ne prennent pas en compte de façon fine les phénomènes convectifs au sein du ballon. Au cours de la deuxième période (Figure 5), le soutirage est arrêté et l'appoint électrique (3 kW) est mis en route jusqu'à ce que la température au niveau de la résistance électrique (hauteur relative : 0.5) atteigne 55 °C. A ce moment, l'appoint est arrêté et un nouveau soutirage est réalisé. La figure 5 montre que les écarts entre les données expérimentales et les simulations sont faibles en haut et en bas du ballon.

Au vu des comparaisons précédentes, nous pouvons considérer que les modèles numériques permettent de simuler de façon satisfaisante les différents composants.

3. Comparaison numérique des performances énergétiques de différents types de CESI

Après avoir validé les modèles utilisés, nous étudions les différents types de CESI vis à vis de leurs performances énergétiques. Le système de régulation on-off met en route ou arrête le circulateur en fonction de l'écart de température entre la sortie du capteur et le bas du ballon. Nous avons utilisé un seuil de mise en route $\Delta T_1=5\text{ }^\circ\text{C}$ et $\Delta T_2=2\text{ }^\circ\text{C}$ pour l'arrêt. Lorsque le débit n'est pas variable, la puissance du circulateur retenue est constante et calculée en fonction du débit. Dans ce cas, les pertes de charges ne sont pas prises en compte car le débit est constant. Le système en débit variable modifie le débit de façon à obtenir un écart de température donné entre la sortie et l'entrée du capteur. Trois écarts de température ont été étudiés : $5\text{ }^\circ\text{C}$, $9\text{ }^\circ\text{C}$ et $13\text{ }^\circ\text{C}$. La puissance à fournir est déterminée en fonction du débit et la puissance maximale considérée vaut 65 W. Concernant le CESI-PV, nous avons développé un modèle simplifié de circulateur en courant continu qui peut être couplé directement avec un module photovoltaïque (20 W dans notre cas). Celui-ci est le « type94 » qui correspond à un modèle analogique composé de 4 paramètres. Le modèle du circulateur est basé sur deux équations utilisées dans l'étude de Ghoneim [5] :

$$V = a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + a_3 H + a_4 H^2 \quad (1)$$

$$Q = b_0 + b_1 I + b_2 H \quad (2)$$

Les paramètres V et I représentent la tension et l'intensité appliquées aux bornes du circulateur et H la hauteur manométrique. Les coefficients a_i et b_i sont constants sans unité. Ils peuvent être obtenus à partir de mesures ou de valeurs fournies par le fabricant [5]. Le modèle PV détermine le fonctionnement du module dans des conditions réelles (en fonction de sa température). Le point de fonctionnement I-V-H est défini par l'équation (1). L'équation (2) relie le débit du circulateur avec l'intensité et la perte de charge de l'installation. Ce modèle de circulateur est simplifié dans la mesure où il ne prend pas en compte le moteur et son comportement mécanique (frottement) et électrique (condensateur, LCB) notamment lorsque la puissance d'alimentation est faible (intensité nécessaire au démarrage...).

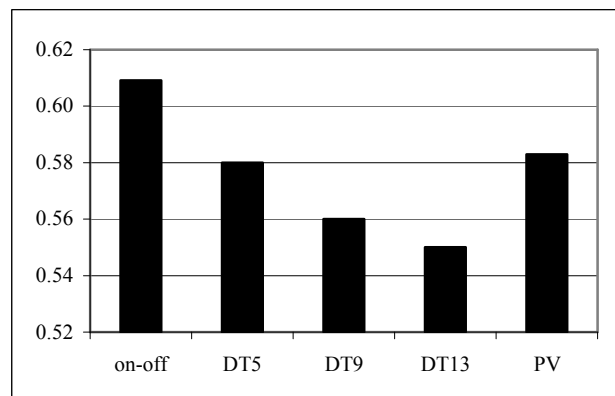
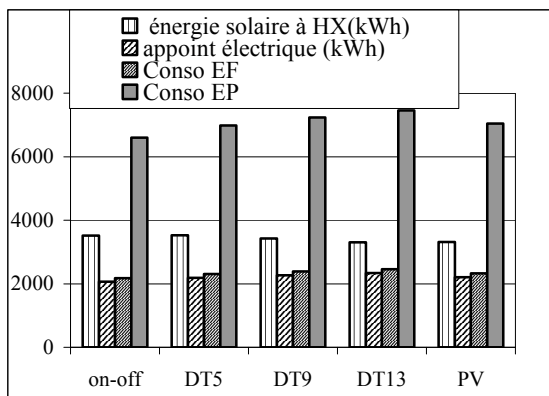


Figure 6 : Energies d'appoint et solaire au niveau du ballon au cours de l'année

Figure 7 : Taux d'économie énergétique par rapport à la solution conventionnelle (non solaire)

La figure 6 présente l'énergie solaire apportée par l'échangeur, les besoins énergétiques (appoint électrique), et les consommations sur une année en énergie finale (rendement 0.95) et primaire (coefficient multiplicateur 2.58) des différentes configurations. La consommation la plus faible est obtenue avec le fonctionnement on-off, même si celui-ci est pénalisé par la consommation électrique du circulateur et du régulateur (comparativement à la solution CESI-PV). Les économies sur la consommation d'énergie finale entre les installations solaires et une installation classique (non solaire) sont représentées sur la figure 7. Le taux le plus élevé est bien sûr obtenu avec le système on-off. Le CESI-PV permet d'atteindre un taux d'économie équivalent au débit variable lorsque ΔT vaut 5 degrés. Ce résultat a déjà été mis en évidence dans l'étude [10].

4. Optimisation des performances énergétiques et économiques (système on-off)

Nous avons vu que le système on-off présente les économies énergétiques les plus élevées. Nous allons voir qu'il est encore possible dans cette configuration d'améliorer les performances grâce l'utilisation d'un outil d'optimisation. Nous avons retenu deux critères d'optimisation : l'énergie (directement lié au critère environnemental basé sur les émissions de CO₂) et le coût (coût global actualisé). L'optimisation du CESI est réalisée grâce au couplage du logiciel TRNSYS avec le logiciel GenOpt [11]. Le critère d'optimisation énergétique repose sur le taux d'économie d'énergie finale F_{sav-f} par rapport une installation conventionnelle sans solaire. Par ailleurs, pour comparer les installations à un niveau de prestation équivalent, nous avons rajouté à la consommation énergétique finale un terme supplémentaire lorsque la température de départ est inférieure à la consigne (55°C). Concernant l'aspect économique, la méthode du coût global actualisé (CGA) (en eruo) [12] est une des approches les plus utilisées pour évaluer le coût financier. Elle consiste à évaluer l'ensemble des dépenses (investissement, entretien et fonctionnement annuels) et recettes (aides financières ...) relatives à une installation tout au long de sa durée de vie (supposée égale à 20 ans).

$$CGA = I_0 + K * D \quad (3) \quad K = \frac{r \cdot (r^n - 1)}{r - 1} \quad (4) \quad r = \frac{1+i}{1+a} \quad (5)$$

Avec : I₀, investissement d'année 0; D, dépense annuelle ; n, nombre d'année de l'installation; i, taux d'inflation (0.02 en France) ; a, taux d'actualisation (0.04 en France).

Nous avons calculé la masse de CO₂ non émise en utilisant le coefficient 0.089 kg/kWh. L'économie de CO₂ réalisée par rapport à la solution conventionnelle correspond dans notre cas à F_{sav-f} . Nous avons choisi 4 variables à optimiser : l'inclinaison et la surface du capteur, le volume du ballon et le débit dans la boucle solaire. Les critères d'optimisation sont le Coût Global Actualisé (CGA) et le taux d'économie F_{sav-f} . La méthode de Hooke et Jeeves a été utilisée. Les résultats de l'optimisation des paramètres selon les deux critères sont présentés dans le tableau 1. Les installations solaires sont toutes plus économiques que la solution conventionnelle sans solaire. L'économie sur le CGA est ainsi de 19.8 % dans le cas de la solution obtenue avec ce critère d'optimisation. Par rapport à l'installation solaire de base, la baisse de la consommation d'énergie finale est de 21 % avec le critère du CGA et de 43 % avec le critère énergétique. L'inconvénient de ce dernier critère est qu'il tend à maximiser la surface de capteur (la valeur maximale de ce paramètre doit donc être limitée). La productivité des capteurs est alors de seulement 269 kWh/m². La réduction du CGA est de 6.2 % avec le critère CGA et de 0.8 % avec le critère énergétique. Le critère du CGA est beaucoup plus intéressant car il prend en compte à la fois l'aspect financier et la consommation énergétique.

		Base	Optimisation solaire			Conventionnel
		Solaire	Valeur initiale	CGA	Energie	Non solaire
Variables	Scapteur (m ²)	6	4	8.4	15	
	Vballon (litre)	400	400	300	315	
	Qcap (L/h.m ²)	50	50	18.5	24	
	Inclinaison de capteur (°)	45	45	46	45	
Energie	Productivité (kWh/m ²)	474	483	552	269	5248
	EF (kWh)	2179	2725	1714	1252	
	Fsav-f	0.58	0.48	0.67	0.73	
CO ₂	M _{CO2} (kg)	292	233	333	357	486
Coût	CGA (€ TTC)	9173	9937	8606	9103	10744

Tableau1 : Résultats de l'optimisation de l'installation On-Off

5. Conclusion

L'énergie solaire a énormément d'avantages. Une fois l'investissement initial réalisé, elle permet de faire des économies sur l'énergie conventionnelle et d'éviter les émissions de CO₂ correspondantes. Nous avons pu valider les modèles des différents composants utilisés dans l'installation CESI grâce aux résultats expérimentaux. Un modèle de circulateur a été développé sous TRNSYS de façon à modéliser le CESI-PV. La comparaison des performances énergétiques a mis en évidence un léger avantage du système on-off. L'optimisation obtenue à l'aide de TRNSYS et GenOpt montre l'intérêt d'une telle approche pour l'amélioration des performances des CESI. L'utilisation d'un critère d'optimisation purement énergétique n'est pas idéale dans la mesure où le coût financier n'est pas intégré (risque de sur-dimensionner la surface des capteurs). Le CGA présente l'avantage d'intégrer à la fois le coût financier et l'énergie d'appoint. En revanche, la validité des résultats relatifs à ce critère repose entièrement sur les hypothèses des coûts (investissement, coefficients d'actualisation ...) et il est donc nécessaire de les évaluer le plus précisément possible. La suite de ce travail porte sur l'optimisation d'une installation CESI-PV puisque nous pensons que ce système présente des avantages importants liés au coût (réduction du coût d'investissement et de l'entretien) et à la fiabilité (risques de dysfonctionnement réduits par l'absence de sondes et de paramétrage du régulateur). Une étude récente du CSTB a en effet mis en évidence la faible productivités réelle des CESI en raison notamment de problèmes liés au régulateur [13]. L'optimisation du CESI-PV va nécessiter au préalable le développement d'un modèle spécifique de circulateur intégrant le moteur et la pompe.

Références

- [1] Cardinale, N., F. Piccininni, et al. *Economic optimization of low-flow solar domestic hot water plants*. Renewable Energy 28(12): 1899-1914, 2003.
- [2] Juan Pablo L. C. Salazar, S. L. A. Salazar, et al. *Optimization of a compact solar domestic hot water system for low-income families with peak demand and total cost constrains*, P2-P4. Solar World Congress 2003.
- [3] Al-Ibrahim, A. M., W. A. Beckman, et al. *Design Procedure For Selecting An Optimum Photovoltaic Pumping System In A Solar Domestic Hot Water System*. 64(4-6): 227-239, 1998.
- [4] Dayan, Myrna. *High performance in low-flow solar domestic hot water systems*. Master of Science. Thesis, University of Wisconsin-Madison., 1997.
- [5] Ghoneim, A. A. *Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems*, Energy Conversion and Management, Volume 47, Issues. 11-12, pp1449-1463, 2006.
- [6] Firatoglu, Z. A. and B. Yesilata. *New approaches on the optimization of directly coupled PV pumping systems*. 77(1): 81-93, 2004.
- [7] TRNSYS : Site Internet sur CSTB http://software.cstb.fr/soft/present.asp?page_id=fr!Trnsys
Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin
- [8] PLANTIER, C. *Etude numérique et expérimentale d'un prototype de chauffe-eau solaire équipé d'un stockage à changement de phase*. Thèse, Université de Savoie, 2003.
- [9] DRUECK.H. MULTIPORT Store-Model-Type140-version 1.99B- Institut fur Thermodynamik und Warmetechnik Universitat Stuttgart, 2000.
- [10] Guergen, M. *Autonomie des chauffe-eau solaires individuels grâce à l'alimentation photovoltaïque du circulateur*, rapport de master de l'Université de Savoie, 96 p., 2005.
- [11] GenOpt : outil de réaliser l'optimisation du système, Site Internet : <http://gundog.lbl.gov/GO/>
- [12] Brandemuehl MJ, Beckman WA. *Economic evaluation and optimization of solar heating systems*. Solar Energy 23:1-10, 1979.
- [13] Carol BUSCARLET et Dominique CACCAVELLI. *Suivi et évaluation énergétique du Plan Soleil - chauffe-eau solaires individuels*. Synthèse du programme de suivi sur sites, CSTB. 10 août 2006. 12 p.

Remerciements

Nous remercions tout particulièrement l'Assemblée des Pays de Savoie (APS) et le CNRS pour le financement de la Thèse de Yu Bai et la société CLIPSOL partenaire du projet.