

Définition d'une Procédure d'Évaluation Appliquée aux Systèmes Combinés Solaires

R. Morlot¹, M.A. Meunier², D. Caccavelli¹ et J.J. Beziau²

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), B.P. 209, 06904 Sophia-Antipolis Cedex, France

² Centre d'Énergétique de l'École de Mines de Paris (CENERG), B.P. 207, 06904 Sophia-Antipolis Cedex, France

Résumé - Cet article présente l'utilisation d'un laboratoire semi-virtuel comme moyen expérimental d'évaluation des systèmes solaires combinés pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire des logements individuels. Constitué d'une partie logicielle et d'une partie hydraulique connectées à la partie réelle à tester, le laboratoire assure un dialogue en temps réel pour replacer le système combiné testé en situation extrapolable à la réalité in situ. En effet, la partie logicielle modélise le comportement des éléments périphériques au système. L'évaluation passe par une identification préliminaire prévue par une procédure dite AC/DC. Certains problèmes liés aux constantes de temps des systèmes combinés restent sous-jacents. De ce fait une modélisation complète des éléments constitutifs du système testé est nécessaire.

1. PRESENTATION DE LA DEMARCHE

Alors que l'eau chaude sanitaire solaire a d'ores et déjà atteint le seuil de rentabilité économique dans un grand nombre de pays européens, l'émergence aujourd'hui d'un marché de systèmes solaires, désignés sous l'appellation de systèmes combinés, assurant la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire semble certainement l'une des techniques les plus prometteuses pour l'avenir. Le système le plus connu en France est le Plancher Solaire Direct (PSD). Contrairement aux chauffe-eau solaires, il n'existe à ce jour aucune procédure d'évaluation des PSD, que ce soit par le biais de normes ou d'Avis Techniques. Ceci ne peut être qu'un frein au développement de cette technique notamment dans la conjoncture actuelle caractérisée par une relance de l'activité solaire en France (Programme HELIOS 2006 soutenu par l'ADEME) ou dans la perspective du futur marché unique. C'est la raison pour laquelle l'ensemble des fabricants français de matériels solaires est favorable à la création d'une telle procédure d'évaluation.

La complexité et la diversité des systèmes combinés existants [1] ne permettent pas de tester ces systèmes sur des bancs d'essais à l'instar de ce qui se fait pour les chauffe-eau solaires. Le recours à la simulation numérique d'une partie des périphériques (source et charge) est donc une alternative incontournable. Un banc d'essai semi-virtuel est d'ailleurs en cours de construction au centre d'essais SPF (Solartechnik Prüfung Forschung de Rapperswill en Suisse). Il sert pour l'instant à l'étude des ballons solaires : produits haut de gamme avec système "low-flow", chauffage + eau chaude, régulations sophistiquées et stratification. Un débouché pour leur laboratoire est également l'évaluation des systèmes combinés. Leur laboratoire peut simuler des capteurs et d'autres parties d'une installation. Une des caractéristiques notables de leur démarche est l'utilisation de l'environnement de simulation TRNSYS. Un rapprochement avec ce laboratoire pour élaborer procédure commune d'évaluation des systèmes combinés pourrait nous déboucher sur un projet de pré-standardisation européenne.

On se propose donc d'évaluer en laboratoire la performance globale de systèmes combinés dont une partie serait représentée par des composants virtuels (bâtiment, émetteurs, capteurs solaires, climat, etc.) et l'autre par des composants réels (produits constructeurs). Le CSTB et le Centre d'Énergétique de l'École des Mines de Paris ont élaboré un environnement informatique capable de simuler le comportement virtuel d'un bâtiment et de ses équipements techniques auxquels on connecte, via une interface (centrale d'acquisition), un dispositif réel de régulation. Sur la base de cet outil numérique, en tenant compte des travaux de la tâche 26 de l'Agence Internationale de l'énergie et en partenariat avec les acteurs concernés (industriels, pouvoirs publics, bureaux d'études, associations), cet article a pour objectif de définir une procédure simplifiée d'évaluation des systèmes combinés. Celle-ci doit permettre soit de comparer divers systèmes entre eux (en terme de performance par exemple et sur un nombre limité de configurations), soit de vérifier qu'un système est conforme à ses spécifications.

2. LES MOYENS MIS EN OEUVRE

La procédure complète de caractérisation des systèmes solaires combinés consiste donc en une phase d'évaluation des performances (identification des caractéristiques du système). Un laboratoire semi-virtuel est utilisé. Il se décompose en une partie réelle et une partie logicielle. Le dialogue entre ces deux parties se fait par l'intermédiaire d'une interface (centrale d'acquisition et de commande), selon deux types de liaisons :

- les liaisons numériques qui assurent le transfert des données entre les modèles (partie logicielle) et la fonction contrôle- commande,
- les liaisons contrôle-commande qui assurent le transfert des données mesurées sur la partie réelle à l'interface et inversement.

Les simulateurs des éléments périphériques réels sont constitués d'une partie hydraulique composée d'éléments représentant physiquement le capteur solaire et l'émetteur de chaleur [Annexe 1]. Les grandeurs énergétiques transmises à la partie réelle, sont calées par les résultats de codes de calcul simulant chacun de ces éléments périphériques.

L'**interface** assure le dialogue en temps réel et influence la souplesse, la précision et la sensibilité du banc d'essais. L'interface doit donc faire l'objet d'une attention toute particulière, notamment en fonction des séquences "types" retenues pour les tests d'évaluation (notion sur lesquelles nous reviendrons), et être cohérente avec la précision des mesures (de l'ordre de 0,1 °C en température et de 1% en puissance), la précision des calculs numériques et les temps de réponse des différents équipements de régulation choisis (compris entre 2 et 5 minutes).

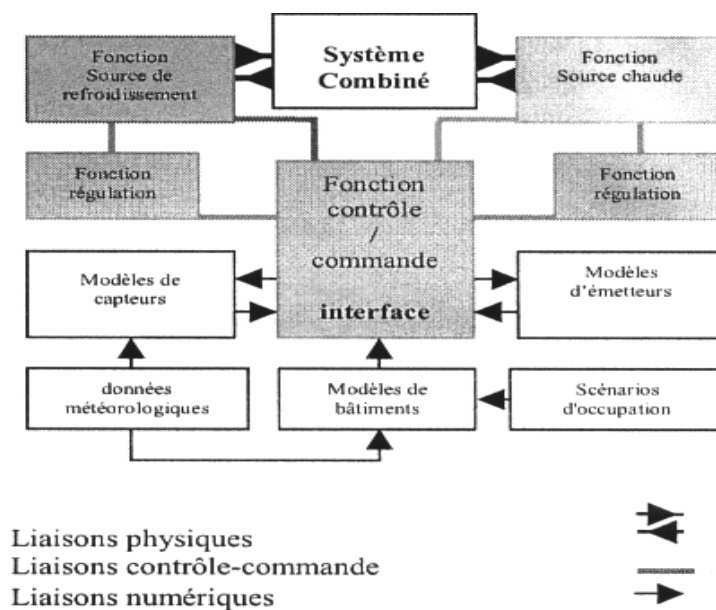


Fig. 1: Relations entre modèles numériques et composants physiques

Outre l'ensemble des données météorologiques disponibles, la **partie logicielle** modélise et simule les composants virtuels tels que les capteurs solaires, les bâtiments et les émetteurs. L'environnement informatique retenu pour la modélisation et le dialogue temps réel avec l'interface, est MATLAB-SIMULINK, [2]. Cet environnement permet une visualisation des différents éléments de l'installation modélisée, ainsi que des flux d'information existant entre eux, nécessaires aux calculs.

Les capteurs solaires sont modélisés selon une approche quadratique du rendement :

$$\eta_{\text{capteur}} = a_0 - a_1 \cdot \Delta T / G - a_2 \cdot (\Delta T)^2 / G \quad (1)$$

ΔT étant la différence de température entre la température moyenne du fluide caloporteur et l'extérieur ($a_0 = 0,8$, $a_1 = 3,5$ et $a_2 = 0,015$ pour un capteur plan de référence).

Les besoins en chauffage sont simulés à travers la modélisation des bâtiments, des émetteurs et des scénarios d'occupation. Le bâtiment représentatif pour les tests est la maison de type "Mozart" pour le secteur résidentiel [3]. Les techniques de modèles réduits obtenus par approche modale sont utilisées. Formalisé dans le langage de la théorie des systèmes mettant à disposition un arsenal d'outils et de ressources mathématiques fiables, le système d'équations différentielles discrétisées ou système d'équations d'état à résoudre est alors le suivant [4] :

$$\begin{aligned} X(t) &= A \cdot X(t) + B \cdot U(t) \\ Y(t) &= F \cdot X(t) + H \cdot U(t) \end{aligned} \quad (2)$$

X étant le vecteur des variables d'état, U celui des sollicitations extérieures et Y les variables d'observation.

3. PROCEDURE D'ÉVALUATION

L'évaluation des systèmes combinés doit être enregistrée selon un formalisme particulier issu d'une méthodologie détaillée dans le cahier des charges [3]. Le constructeur doit ainsi équiper une maison de type "Mozart", située dans une zone climatique donnée, et pour des besoins liés à un scénario d'occupation connu. En plus de vérifier les performances du système, la méthodologie teste aussi les capacités du constructeur à dimensionner l'installation. En fonction des hypothèses et données retenues dans les cahiers des charges, le constructeur règle et optimise son système. Suite à la mise au point et à l'achèvement de la phase d'initialisation pour s'affranchir des constantes de temps inhérentes au système réel, la méthodologie prévoit l'identification par l'application d'une séquence météorologique type.

La procédure d'essais se décline en trois phases :

- mise en régime stationnaire de la machine sous les conditions nominales,
- détermination des caractéristiques en régime dynamique (phase d'identification),
- détermination de la performance thermique annuelle de l'installation pour quatre climats représentatifs du confort thermique : Trappes, Limoges, Millau et Carpentras,
- extrapolation aux installations d'une même gamme.

La méthode (Annual Calculation and/or Direct Caractérisation) [5] est utilisée pour les systèmes combinés. Une première séquence de 6 jours, condensant les conditions réelles des quatre saisons (hiver, mi- saison, été), permet d'estimer l'énergie consommée $E_{DC,t}$ (Direct Caractérisation), et certains indicateurs de performance (capacité thermique des auxiliaires, temps d'attente nécessaire entre deux sollicitations types, écart d'énergie sur la séquence test, efficacité du ballon, $F_{SAV}...$). Pour le même système, une séquence d'essais additionnelle (optionnelle) permet l'identification de paramètres pour la modélisation et la simulation à court et long termes des énergies consommées $E_{DC,s}$ et $E_{AC,s}$ (Annual Caractérisation). Un facteur de conversion $f_{AC/DC}$ est alors défini par :

$$f_{AC/DC} = E_{AC,s} / E_{DC,s} \quad (3)$$

E étant mis pour une énergie consommée, mais pouvant faire également référence à une fraction d'énergie évitée. Grâce au facteur de conversion, il est alors possible de calculer par extrapolation la performance thermique annuelle du système, par la formule suivante :

$$E_{AC,t} = f_{AC/DC} \times E_{DC,t} \quad (4)$$

4. PROBLEMES RENCONTRES

Il reste à définir quel type de séquences de tests (réelles et/ou "spécifiques"), est favorable à l'identification de modèles suffisamment précis. En effet pour une séquence test trop compressée, les constantes de temps du système réel peuvent devenir largement supérieures à celles de la séquence météorologique, sans commune mesure avec les conditions naturelles.

Inertie

Sachant que les systèmes combinés, avec leur système de stockage, possèdent de fortes constantes de temps, nous allons essayer de mettre en place une séquence météorologique compressée test qui n'affecte pas la valeur des résultats par rapport à une séquence classique.

Une fois cette première phase réalisée, nous tenterons d'utiliser et d'optimiser cette séquence météorologique compressée afin d'extrapoler les résultats à une année complète d'utilisation.

Cependant, il semble difficile de s'affranchir d'une modélisation des éléments du système testé possédant des constantes de temps très grandes (ballons de stockage) et pour lesquels la météo compressée serait inadaptée.

Extrapolation

Dans le cadre de cette évaluation, il est intéressant de considérer les gamme de produit (volume de stockage différent par exemple) pour limiter le nombre d'essais, et donc d'aller vers l'extrapolation des résultats expérimentaux. Il s'avère alors nécessaire de modéliser les éléments constitutifs du système afin de le recomposer. La figure 2 ci-dessous présente le module de chaudière mixte de production d'ECS et de chauffage. Le bloc supérieur gauche représente les entrées et celui du bas les paramètres. Le bloc de sortie est placé à droite.

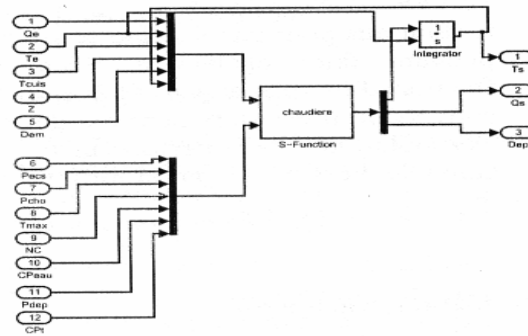


Fig. 2: Module de chaudière mixte sous SIMULINK

Pour une configuration donnée [Annexe 2] et fixe à partir du temps $t = 0$ s, la figure 3 montre l'évolution de la température T_s en sortie.

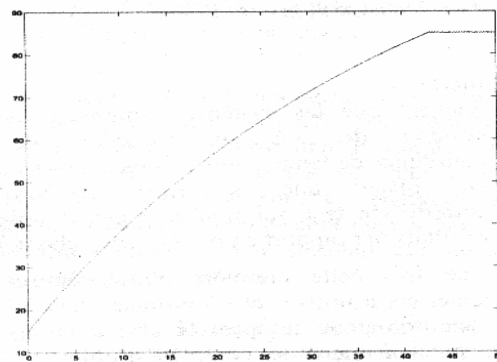


Fig. 3: Evolution de la température d'ECS en sortie chaudière

On voit que pour une demande en température d'ECS soutenue, la valeur atteint un maximum de 85 °C puis oscille autour pour des valeurs de temps au delà de 45 s.

Caractéristiques des périphériques

Il existe deux familles de systèmes combinés à tester : à appoint intégré et appoint séparé. La difficulté est de savoir s'il faut considérer des caractéristiques standards pour les éléments périphériques (capteurs solaires, chaudière) ou prendre en considération les produits imposés par les constructeurs.

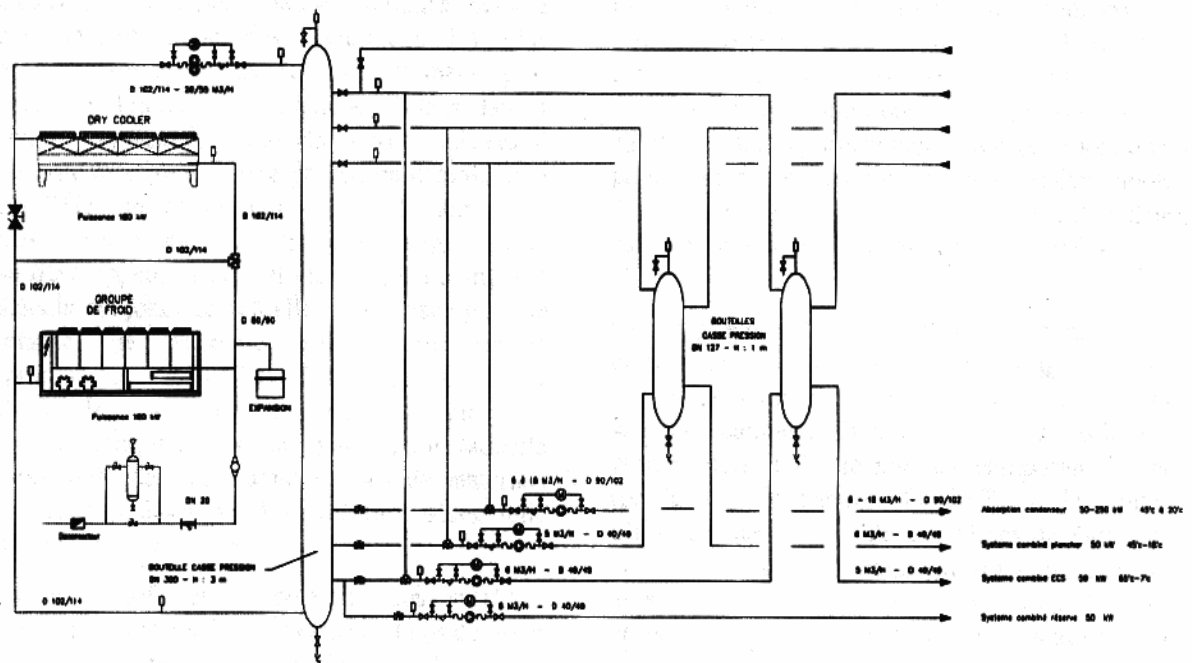
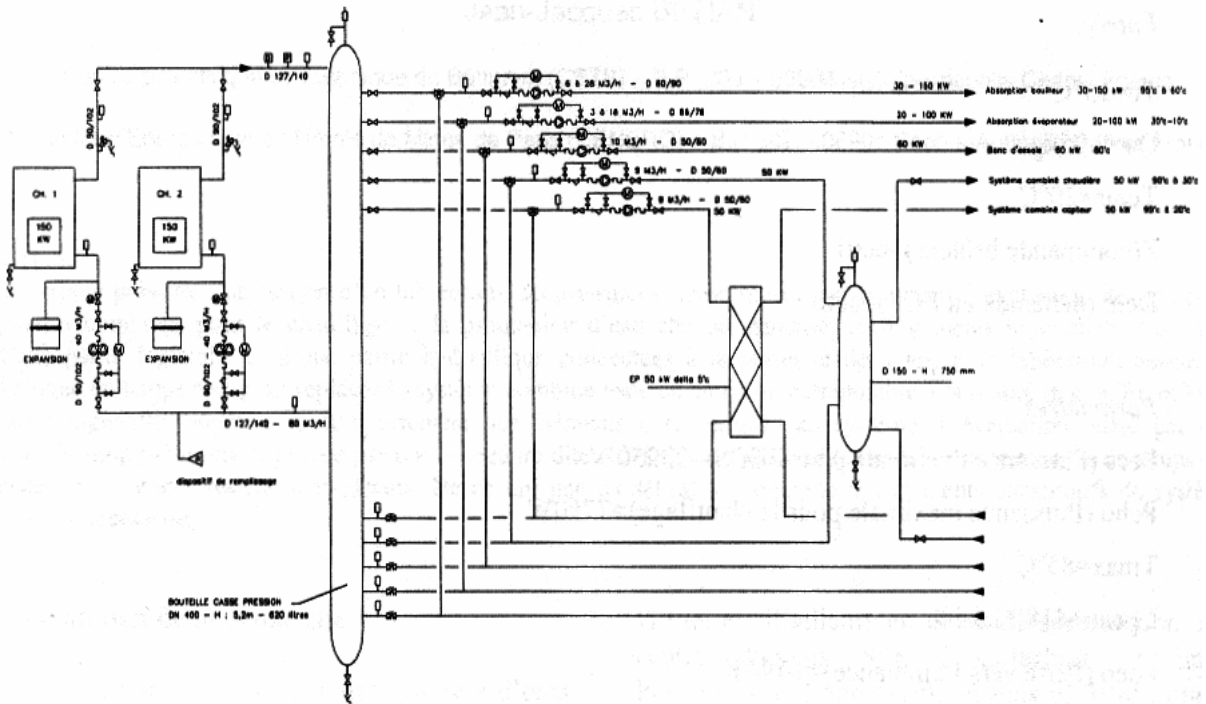
5. CONCLUSION

L'objectif de l'utilisation d'un laboratoire est de disposer d'un environnement de semi-virtuel test souple et relativement rapide à mettre en oeuvre en testant les systèmes dans les conditions proches des conditions réelles. Il permet également d'assurer une reproductibilité parfaite des essais et d'évaluer les performances des systèmes sur des séquences d'essais plus courtes (séquences compressées). Enfin, il nous affranchit des problèmes liés à la météorologie et à la configuration de l'installation (différents type de maisons). Seule la validation permettra de conclure quant à l'éventuelle interaction de la séquence compressée sur la méthodologie retenue.

REFERENCES

- [1] J.M. Suter, W. Weiss and T. Letz, 'Solar Combisystems', IEA-SHC-TASK26, Printed by Ott Verlag + Druck AG, Thun, Switzerland, 2000.
- [2] H. Vaezi-Nejad, 'SIMBAD version 3.0 : outil convivial d'évaluation des GTB', CSTB Magazine, n°95, Juin 1996..
- [3] D. Caccavelli, J.J. Bezian et M.A. Meunier, 'Procédure d'Evaluation des Systèmes Combinés : Cahier des charges', Rapport interne, Décembre 2000.
- [4] R. Morlot, 'Contribution au développement de méthodes de réduction de systèmes thermiques complexes', Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1999.
- [5] C. Bales (Solar Energy Research Center, SERC-Suède), 'Development of Performance Test Methods and Numerical Models for Combisystems and their Components', Milestone Report B5.1-First draft of test procedures, Task 26, Subtask B, Solar Combisystems IEA, Solar Heating and Cooling Programme, Version: 7 October 2000.

Annexe 1: Schéma du banc expérimental (simulateur des sources chaude et froide nécessaires au fonctionnement de la partie réelle)



Annexe 2: Données pour la simulation d'une chaudière mixte**Entrées**

$$T_e = 15 \text{ °C}$$

$$Q_e = 0.05 \text{ kg/s}$$

$$T_{\text{cuis}} = 20 \text{ °C}$$

$$Z \text{ (commande brûleur)} = \text{actif}$$

$$D_{\text{em}} \text{ (demande en ECS)} = \text{actif}$$

Paramètres

$$P_{\text{ecs}} \text{ (Puissance maximale pour l'ECS)} = 23250 \text{ W}$$

$$P_{\text{cho}} \text{ (Puissance maximale pour le chauffage)} = 7750 \text{ W}$$

$$T_{\text{max}} = 85 \text{ °C}$$

$$C_{\text{peau}} = 4180 \text{ J/kg.K}$$

$$P_{\text{dep}} \text{ (Perte vers l'ambiance)} = 10 \text{ W/K}$$

$$C_{\text{pt}} \text{ (Capacité calorifique de la chaudière)} = 8577.5 \text{ J/K}$$