

Rapport annuel 2002 à l'attention de l'Office fédéral de l'énergie

Nom des rapporteurs: Thierry Prud'homme* **e-mail:** Thierry.prudhomme@epfl.ch
Denis Gillet* Denis.Gillet@epfl.ch
Thierry Pittet** Thierry.Pittet@eivd.ch
Jacques Bony** agena.jbony@bluewin.ch
Philippe Dind** Philippe.Dind@eivd.ch

Instituts mandataires: *Laboratoire d'automatique <http://iawww.epfl.ch/>
EPFL

**Laboratoire d'énergétique solaire et <http://solarplant.eivd.ch/>
de physique du bâtiment
EIVD

Titre du projet: Optimisation d'installations solaires combinées

Résumé: Ce projet est composé de deux parties majeures. La première partie concerne l'élaboration d'une stratégie de commande avancée pour les systèmes solaires combinés. Une stratégie de commande optimale utilise des prévisions météorologiques fournies en ligne par l'Institut Suisse de Météorologie (ISM) pour calculer le profil de puissance à dissiper dans le bâtiment. Ce profil garantit un haut degré de confort aux utilisateurs ainsi qu'une diminution de l'ordre de 15 pourcents de la consommation de gaz (énergie d'appoint). Cette valeur a été obtenue en simulation. Cette stratégie est en phase de validation expérimentale à l'aide des modules FieldPoint de National Instruments (NI). La deuxième partie de ce projet concerne la participation à la tâche 26 de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE). Le système solaire combiné Arpège fabriqué par Agena a donc été simulé au moyen de logiciel TRNSYS et les résultats ont été comparés à ceux obtenus pour une dizaine d'autres installations fabriquées dans toute l'Europe. Le but de la tâche est de définir un système idéal qui regroupe les meilleurs éléments de chaque système.

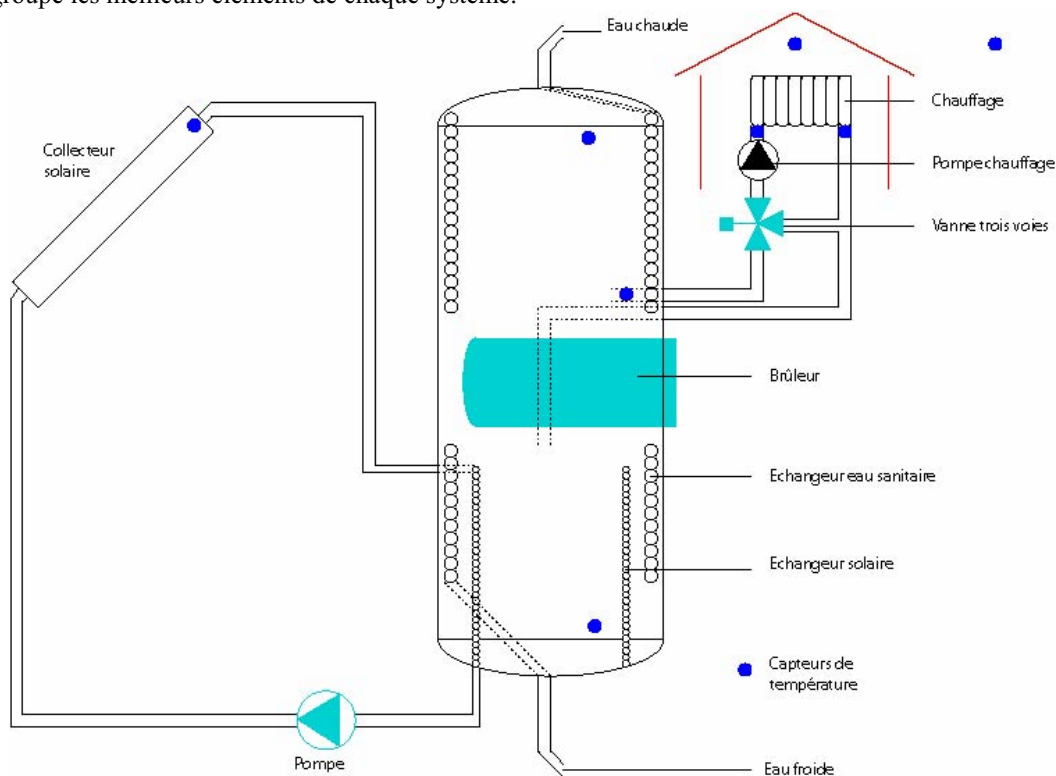


Figure 1: vue schématique du système solaire combiné Arpège

1. Introduction et objectifs

Les stratégies de commande actuelle pour les systèmes solaires combinés reposent essentiellement sur le savoir-faire des fabricants. Les connaissances intrinsèques de l'installation et du bâtiment ainsi que la connaissance a priori de certaines perturbations ne sont à l'heure actuelle pas du tout ou très peu prises en compte. Le but de ce projet est donc de mettre en place une stratégie de commande avancée qui exploite des modèles dynamiques de l'installation et du bâtiment ainsi que des prévisions météorologiques. Ce travail représente une extension de la stratégie développée dans le cadre d'un précédent mandat portant sur les kits solaires de production d'eau chaude sanitaire [6][7].

La stratégie de commande utilisée est une stratégie de commande optimale. Les modèles dynamiques de l'installation et du bâtiment couplés aux prévisions météorologiques permettent de prédire le comportement du système complet. Il est ainsi possible de calculer à l'avance le profil de certaines grandeurs manipulées afin d'obtenir un comportement désiré du système. Ce comportement désiré se traduit mathématiquement par le choix d'une fonction de coût qui est minimisée par une routine d'optimisation. À la figure 1, il apparaît clairement que quatre grandeurs peuvent être manipulées, la pompe de la boucle collecteur, le brûleur à gaz, la vanne trois voies et la pompe chauffage.

Des travaux antérieurs [8] ont montré que la mise en place d'une stratégie de commande avancée pour la pompe solaire n'engendre que d'infimes gains en termes d'énergie solaire transférée à la cuve. Cette grandeur n'est donc pas manipulée dans ce projet, la stratégie standard de commande de cette pompe est conservée.

Quant aux brûleurs, il a été montré [6][7][8] qu'il pouvait être judicieux d'anticiper les soutirages en eau chaude de façon à minimiser la température dans la cuve et de ce fait maximiser la part de l'énergie solaire dans les bilans. Cette stratégie requiert une connaissance a priori des besoins utilisateurs en eau chaude. Dans le cadre de ce projet, il a été supposé que cette connaissance n'était pas disponible. En ce qui concerne les besoins de chauffage, il s'avère que la puissance du brûleur (plus de 20 kW) est largement suffisante pour survenir aux besoins sans qu'une certaine quantité d'eau dans la cuve n'ait été chauffée au préalable. Ainsi, la stratégie de commande standard a été conservée pour le brûleur.

La vanne trois voies et la pompe de chauffage servent toutes deux à contrôler la température à l'aller des convecteurs et donc indirectement la puissance dissipée dans le bâtiment. Ainsi, la seule grandeur calculée par la stratégie de commande avancée est la puissance dissipée dans le bâtiment.

Dans la communauté du réglage automatique, la commande optimale est une stratégie dite "boucle ouverte". Ceci signifie que les grandeurs manipulées, dans notre cas, la puissance dissipée dans le bâtiment, sont calculées à l'avance et appliquées sans qu'aucune mesure sur l'installation ne soit utilisée pour corriger d'éventuelles erreurs de modélisation et des perturbations mal estimées. Ainsi, il a été nécessaire de mettre en place une stratégie d'implantation robuste pour prévenir d'éventuels désagréments de confort aux utilisateurs.

Cette stratégie a été implantée et validée à l'aide de modules FieldPoint de National Instruments. Il s'agit d'un mini-PC muni d'un noyau temps réel. Il est possible de le programmer directement avec LabVIEW. À ce mini-PC s'ajoutent des modules d'entrées et sorties de haut niveau qui permettent d'accéder directement aux actionneurs et capteurs de l'installation.

La tâche 26 de l'agence internationale de l'énergie a pour but de comparer les systèmes solaires combinés d'une dizaine de pays. Dans chacun de ces pays, ces systèmes sont simulés avec le logiciel TRNSYS et les résultats sont comparés. Le but ultime est de définir quel serait le système idéal, en reprenant les éléments les plus performants de chacun des systèmes considérés.

Le deuxième chapitre présente la stratégie de commande avancée élaborée ainsi que son implantation. Des résultats expérimentaux permettent de juger du haut degré de performances et de confort atteint sont également fournis. Le troisième chapitre présente les résultats de la tâche 26. Enfin, le quatrième et dernier chapitre résume l'essentiel des travaux réalisés et présente les perspectives.

2. Mise en œuvre et résultats de la stratégie de commande avancée

2.1. Principe

Le principe de la stratégie de commande avancée retenue est présenté à la figure 2. Les prévisions météorologiques sont fournies en ligne par email par l'Institut Suisse de Météorologie. Elles sont reçues deux fois par jour, la première fois à 5 heures du matin pour des données valables à partir de 0 heure du même jour. En effet, 5 heures sont nécessaires pour le calcul et l'acheminement de ces prévisions. Elles sont reçues une deuxième fois à 17 heures pour des données valables à partir de midi du même jour. Seules les données reçues le matin sont utilisées, les autres arrivant trop tard. Il s'agit de données horaires pour l'ensoleillement horizontal global et la température ambiante pour un horizon de 48 heures. Seules les données pour les 24 premières heures sont utilisées. En d'autres termes, l'horizon de prédiction retenu pour la stratégie de commande optimale est d'une journée.

Un modèle dynamique de l'installation a été élaboré. Il est présenté en détail dans [5]. Un modèle dynamique du bâtiment est également utilisé, il est présenté à la section suivante. Ainsi, les données météorologiques couplées aux modèles du bâtiment et de l'installation permettent de prédire le comportement du système sur une journée complète pour des profils donnés de la puissance à dissiper dans le bâtiment et du débit dans le collecteur. Comme déjà mentionné, dans le cas présent, le débit dans le collecteur n'est pas calculé par la stratégie puisque des résultats antérieurs [8] ont montré que cela n'engendrait que d'infimes améliorations des performances. La stratégie de commande de ce débit est donc celle actuellement utilisée dans la version commerciale du système solaire combiné. De la même manière, l'enclenchement du brûleur n'est pas directement commandé par la stratégie de commande optimale. Ceci sera détaillé à la section traitant de l'implantation robuste de la stratégie.

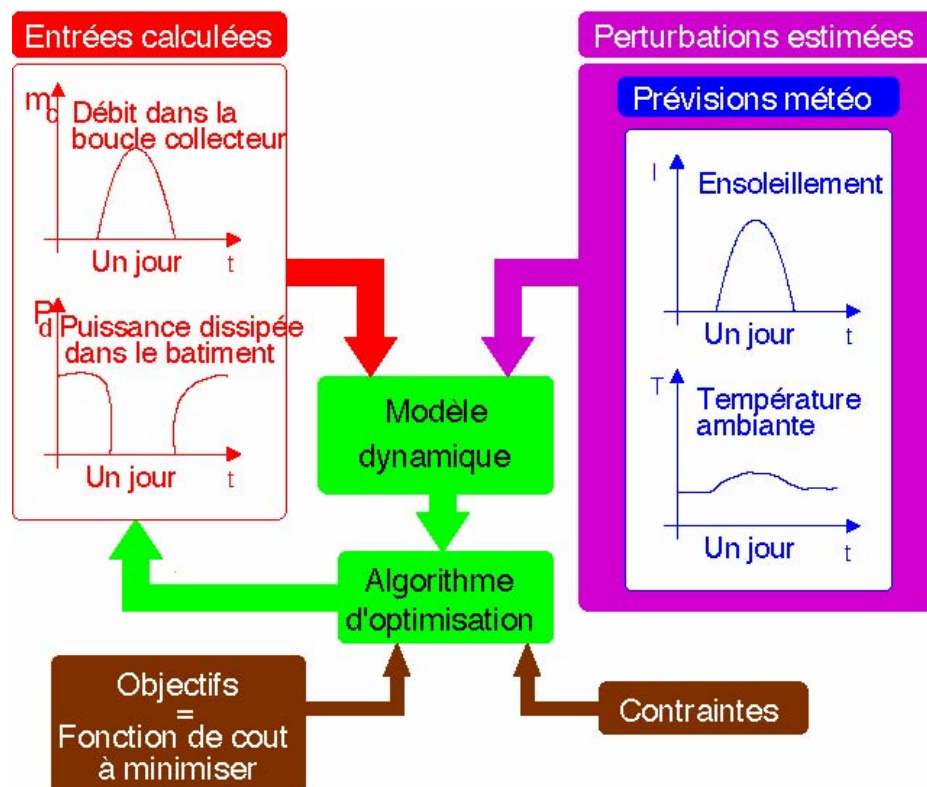


Figure 2: vue schématique de la stratégie de commande avancée

Un algorithme d'optimisation calcule donc le profil de la puissance à dissiper dans le bâtiment pour une journée entière. Ce profil minimise une fonction de coût qui caractérise les performances attendues du système. Dans notre cas précis, on désire un haut degré de confort en même temps qu'une utilisation minimale de l'énergie d'appoint. La fonction de coût utilisée est donc la suivante:

$$J = \int_{\text{Un jour}} (P_{\text{brûleur}} + \alpha(T_{\text{set}} - T_b)^2) dt$$

$P_{\text{brûleur}}$ représente la puissance consommée par le brûleur à gaz, T_{set} est la température désirée dans le bâtiment et T_b la température mesurée dans ce même bâtiment. Le paramètre α représente une pondération entre confort et performances énergétiques.

2.2. Modélisation du bâtiment

Comme précédemment mentionné, la stratégie de commande optimale mise en œuvre nécessite à la fois un modèle du système solaire combiné mais également un modèle dynamique du bâtiment. Si le modèle du système solaire combiné peut facilement être obtenu et maîtrisé, il n'en est pas de même pour celui du bâtiment. En effet, pour chaque système vendu le bâtiment à chauffer sera différent et donc son modèle également. Une procédure de modélisation automatique est donc nécessaire.

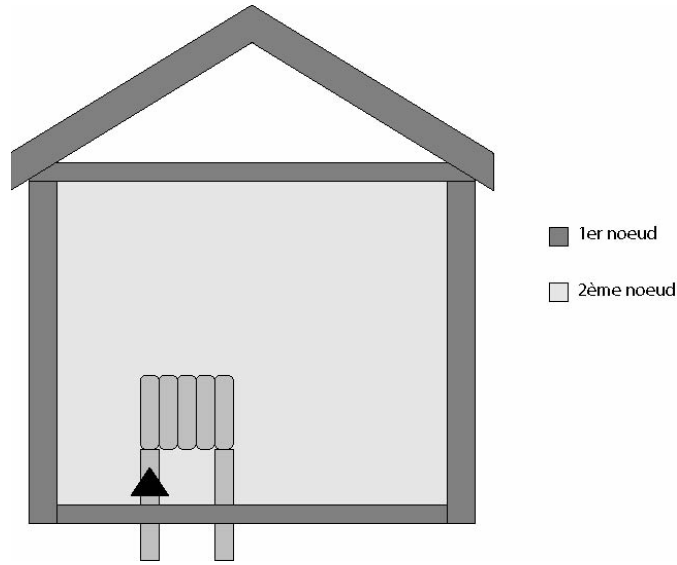


Figure 3: modélisation à 2 nœuds du bâtiment

Ainsi, une structure très simple à deux nœuds a été retenue pour représenter l'évolution dynamique du bâtiment. Cette dernière est présentée à la figure 3. Un nœud sert à représenter le comportement des murs, du toit et du sol, et un autre le comportement de l'air ambiant. Ce modèle comporte sept paramètres qui représentent brièvement l'influence de la température et de l'ensoleillement sur chacun des nœuds, les gains internes et le renouvellement d'air moyens, ainsi que les inerties de chacun des nœuds. Tous ces paramètres sont groupés dans un vecteur θ . Ce paramètre θ est identifié de façon automatique sur l'installation en fonctionnement. Le principe est très simple. La température mesurée par une sonde d'ambiance est enregistrée pendant une durée de cinq jours ainsi que la puissance dissipée dans le bâtiment et les différentes grandeurs qui influencent le comportement de ce dernier (données météorologiques essentiellement). Ensuite, un algorithme d'optimisation du même type que celui utilisé par la commande optimale sert à calculer θ qui minimise la fonction de coût suivante:

$$J = \int_{\text{5 derniers jours}} (T_{\text{mod}} - T_{\text{mes}})^2 dt$$

T_{mod} est la température dans le bâtiment calculée par le modèle et T_{mes} la température dans le bâtiment mesurée. Cette adaptation automatique des paramètres est décrite de façon beaucoup plus précise dans [5].

2.3. Implantation robuste

Le schéma de l'implantation robuste est donné à la figure 4. Deux boucles PID calculent respectivement la température consigne aller chauffage et l'ouverture de la vanne trois voies. Elles permettent de contrôler avec précision la puissance dissipée dans le bâtiment. Enfin, la troisième boucle qui apparaît en vert sert à rendre robuste la stratégie de commande avancée. En effet, la puissance à dissiper optimale est calculée tôt le matin lorsque les prévisions météorologiques arrivent de l'ISM. Cependant, les prévisions météorologiques, tout comme les modèles dynamiques du système solaire combiné et du bâtiment, sont entachés d'erreurs. Ainsi, il est très risqué d'appliquer en boucle ouverte la puissance optimale à dissiper calculée par la routine d'optimisation. Il convient de noter toutefois que la routine d'optimisation ne calcule pas seulement la puissance à dissiper dans le bâtiment mais également la température optimale correspondante, c'est-à-dire la température que l'on obtiendrait dans le bâtiment en appliquant la puissance optimale calculée si les modèles dynamiques ainsi que les prévisions étaient parfaits. Cette troisième boucle assure simplement que le profil de température dans le bâtiment calculé par l'optimisation est consistant avec celui obtenu réellement.

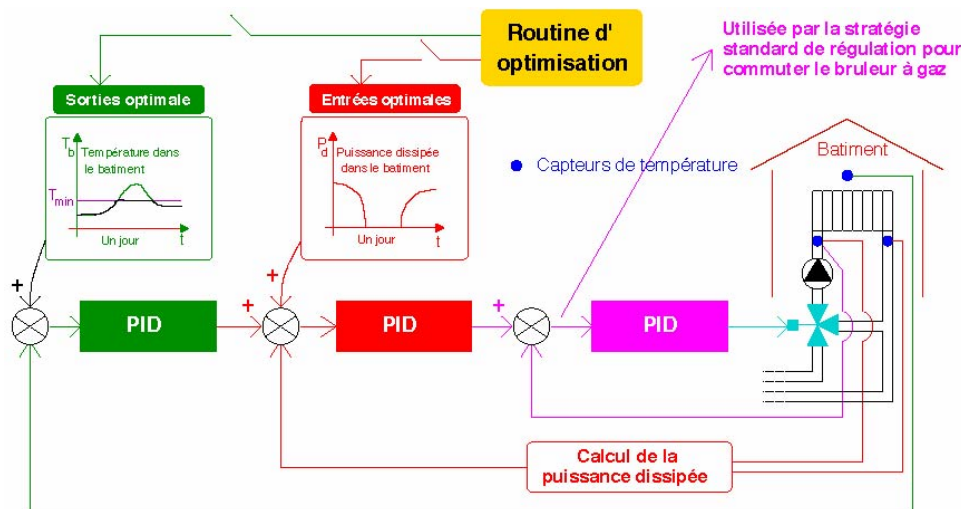


Figure 4: schéma de l'implantation robuste

2.4. Résultats expérimentaux

Cette stratégie a été implantée avec succès sur une installation pilote en fonctionnement au laboratoire d'énergie solaire de l'école d'ingénieurs du canton de Vaud. Les modules FieldPoint de National Instruments ont été utilisés. Le programme réalisant la stratégie consiste donc en un seul VI (virtual instrument, nom donné à une application LabVIEW). Les routines d'optimisation, d'identification automatique des paramètres du bâtiment ainsi que les trois boucles PID ont été écrites en langage C et incorporées au VI principal sous la forme d'une DLL (Dynamically Linked Library).

Cette stratégie a également été comparée à la stratégie standard. L'installation pilote permet de commuter facilement entre ces deux stratégies. Pour mener à bien cette comparaison, une série de sept jours a été retenue. Pour ces sept jours, on dispose des prévisions météorologiques et des données réelles mesurées. L'ensoleillement est simulé grâce au simulateur solaire présent à l'endroit de l'installation pilote. Ce simulateur est décrit en détail dans [4]. Le bâtiment est simulé à l'aide d'un PC qui s'occupe de commander des ventilo-convecteurs. Le bâtiment simulé est lui aussi décrit dans [3]. La stratégie d'identification automatique des paramètres du modèle du bâtiment n'a pu être testée à cause d'une durée d'expérimentation trop faible. Elle a néanmoins été validée au préalable pour un bâtiment réel [5].

3. Collaborations internationales en relation avec la tâche 26 de l'AIE

3.1. Introduction

Le groupe de travail de la tâche 26 était divisé en trois sous-tâches s'occupant de domaines bien spécifiques :

Sous-tâche A: Classification et divulgation des résultats des deux autres sous-tâches.

Sous-tâche B: Développement de méthodes de tests pour systèmes solaires combinés. Plusieurs pays développent simultanément des bancs d'essais pour des systèmes solaires combinés. En Suisse, le SPF à Rapperswil a mis en place ce type d'installation.

Sous-tâche C: Comparaison et optimisation à l'aide de simulations numériques utilisant le logiciel TRNSYS. C'est dans le cadre de ce groupe de travail que nous avons analysé et simulé le système solaire combiné Arpège.

Durant l'année 2002, deux rencontres des participants à la tâche 26 ont été organisées. La première en avril à Oslo (Norvège), la seconde en septembre à Bad Blumau (Autriche). Cette dernière finalisait trois ans de mise en commun du travail des différentes équipes.

3.2. Fraction d'énergie économisée

Afin de pouvoir caractériser une installation solaire combinée, il est important de pouvoir comparer ces performances avec d'autres installations. Thomas Letz (ASDER, Saint-Alban-Leyse, France) et Philippe Papillon (Clipsol-Recherche, Trevignin, France) ont développés un outil de comparaison appelé fraction d'énergie économisée (fractional energy savings, f_{sav}). En se basant sur un système de référence à chaudière conventionnelle, nous pouvons définir la proportion d'énergie fossile économisée en utilisant un système solaire combiné. Le f_{sav} s'exprime comme suit :

$$f_{sav} = 1 - \frac{\frac{Q_{aux}}{\eta_{aux}}}{\frac{Q_{aux,ref}}{\eta_{aux,ref}}}$$

3.3. Particularité 2002

Lors des rencontres organisées tous les 6 mois dans le cadre de la sous-tâche C, les participants ont présenté l'avancement de leurs travaux. En plus de ces présentations, nous avons eu l'opportunité de présenter les mesures effectuées à Dombresson (2000-2001) [1] [9].

Le «hand book», ouvrage qui décrira tout le travail accompli au cours de la sous-tâche, sera édité au début de l'année 2003. Les derniers détails ont été mis au point en accord avec les participants et les auteurs.

3.4. Optimisation

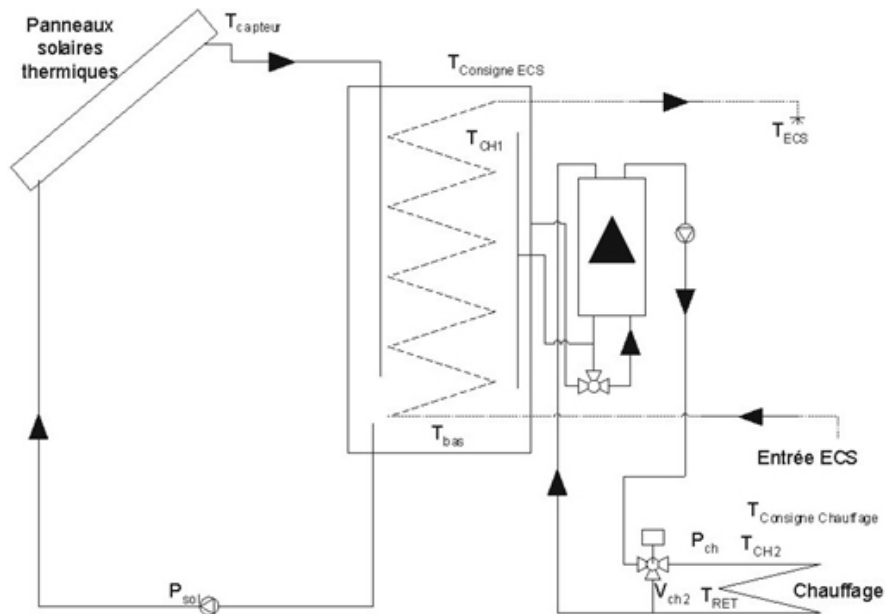
Depuis le début de la tâche 26, le système solaire combiné Arpège d'Agena a été simulé avec le logiciel TRNSYS. De nombreuses simulations ont été effectuées permettant une augmentation du f_{sav} [1] de 5 points à 34.2% pour le cas de base (climat de Zürich, 12 m² de capteurs plans, une consommation en chaude sanitaire de 8,28 kWh/jour et une demande en chauffage de 60 kWh/m² a). Nous remarquons que nous arrivons à la limite des possibilités d'amélioration de l'installation dans sa configuration actuelle.

De 1999 à 2001 : + 17 % sur le f_{sav} . Les modifications apportées ont été introduites chez le fabricant car elles étaient peu coûteuses et engendraient des gains importants [2].

Les différents groupes de travail de la tâche 26 ont manifesté un grand intérêt quant aux résultats fournis par la commande avancée.

3.5. Système idéal

À la fin d'une telle tâche, chacun souhaite dire quel est ou quel serait le système solaire combiné idéal (avec un f_{sav} très élevé), appelé «dream system». Le Solar energy research center-SERC de Borlänge en Suède et L'EIVD ont été mandatés pour étudier une telle installation. Nous avons donc rassemblé les points forts de chaque système simulé dans le cadre de la tâche 26. Après avoir corrélé et optimisé les différents paramètres, nous sommes arrivés à un $f_{sav} = 40.5\%$ pour une installation avec chaudière à gaz externe (figure 5). Cette valeur de f_{sav} est donnée pour les conditions mentionnées à la Section 3.4.



Figures 5: schéma d'un «dream system» avec chaudière externe

3.6. Énergie grise

La comparaison et l'optimisation des différents systèmes solaires combinés, du point de vue de leur efficacité, étaient sans nul doute l'un des objectifs principaux de cette tâche 26.

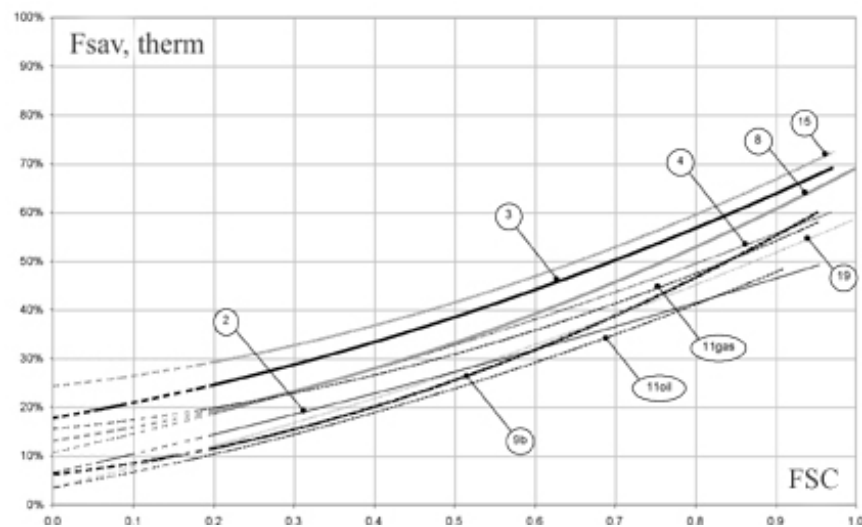


Figure 6: comparaison des différents systèmes solaires combinés (#8 Arpège de Agena)

Il nous est paru essentiel de comparer également le poids et l'énergie grise de chaque installation. Dans ce domaine, le système Arpège est très lourd et possède une énergie grise très élevée par rapport aux autres systèmes. Ces différences importantes sont dues d'une part aux capteurs (le capteur Azur d'Agena possède un

cadre en aluminium pour chaque 2 m² et un absorbeur composé de deux feuilles d'acier inox) et également à une masse importante d'acier pour la protection des connexions hydrauliques, du brûleur et de la partie électrique (régulation). En revanche, de par ces bonnes performances (figure 6), le «temps de remboursement énergétique» d'Arpège est plus court que celui de certains systèmes qui présentent une masse et une énergie grise plus faibles.

4. Conclusions et perspectives

La stratégie de commande avancée développée dans le cadre de ce projet s'est avérée très performante. Une réduction de plus de 15 pourcents de la consommation de gaz a été observée en simulation. La validation expérimentale de ces résultats est en cours. De plus, le niveau de confort observé est excellent.

L'implantation d'une commande avancée incluant une procédure automatique d'estimation du modèle du bâtiment sur du matériel industriel générique de contrôle de processus a constitué en 2002 l'ultime étape pour l'industrialisation. Son exploitation ne se limite d'ailleurs pas aux installations solaires. La stratégie développée est d'ailleurs en passe d'être testée et déployée sur des bâtiments publics dont la gestion du chauffage et de l'eau chaude sanitaire est assurée par les services industriels de la ville de Lausanne.

La tâche 26 se termine fin 2002, avec la publication d'une brochure appelée «Hand book» qui contiendra toutes les caractéristiques et les performances de chaque installation testée. Le système combiné Arpège se situe en troisième position parmi les systèmes comparés dans le cadre de la tâche 26.

L'optimisation dans le cadre de ce projet a permis au système solaire combiné Arpège de se situer dans la partie supérieure des performances. De plus, les simulations d'un système «idéal» ouvrent des voies à exploiter pour les prochains développements d'installations solaires combinées.

5. Publications

- [1] O. Renoult, J. Bony et P. Dind. *Résultat d'une campagne de mesures in situ d'une installation solaire combinée*. Rapport interne, laboratoire d'énergétique solaire et de physique du bâtiment, EIVD-HESSO, Août 2001.
- [2] A. Gherbi, O. Renoult et J. Bony. *Optimisation d'installations solaires thermiques combinées*. Rapport final à l'attention de l'Office Fédéral de l'Energie, Laboratoire d'automatique, EPFL, Décembre 2001.
- [3] M. Bauer. *Modélisation d'un bâtiment pour un système solaire combiné*. Rapport de synthèse, Estia sàrl, PSE-B Parc scientifique de l'EPFL, CH-1015 Lausanne, Novembre 2000.
- [4] J. Bony. *Émulateur de capteurs solaires*. Rapport interne, laboratoire d'énergétique solaire et de physique du bâtiment, EIVD-HESSO, Novembre 2000.
- [5] T. Prud'homme et D. Gillet. *Commande optimale de systèmes solaires combinés*. Rapport final à l'attention de l'Office Fédéral de l'Energie, Laboratoire d'automatique, EPFL, Décembre 2002.
- [6] T. Prud'homme et D. Gillet. *Optimisation of Solar Domestic Hot Water Systems*. EuroSun'98, volume 2, Portoroz, Slovenia, 1998.
- [7] T. Prud'homme et D. Gillet. *Advanced Control Strategy of Solar Domestic Hot Water Systems with a Segmented Auxiliary Heater*. Energy and Building, 33(5):463-475, 2001.
- [8] T. Prud'homme et D. Gillet. *Supervision automatique d'installations solaires thermiques. Première partie consacrée aux kits solaires de production d'eau chaude sanitaire*. Rapport final à l'attention de l'Office Fédéral de l'Energie, Laboratoire d'automatique, EPFL, Février 1999.
- [9] Th. Pittet, J. Bony, O. Renoult, Ph. Dind, *Measurement of a solar combisystem in situ*. Eurosun 2002, ISES Europe solar congress, Bologna, éd. ISES ITALIA, Roma, 2002.