

## Rapport annuel 2000 à l'attention de l'Office fédéral de l'énergie

**Nom des rapporteurs:** T Prud'homme, A. Gherbi, O. Renoult, J. Bony, D. Gillet et Ph. Dind  
**e-mail:** [Thierry.Prudhomme@epfl.ch](mailto:Thierry.Prudhomme@epfl.ch), [Olivier.Renoult@eivd.ch](mailto:Olivier.Renoult@eivd.ch)

**Institut mandataire:** Institut d'automatique – École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)  
Laboratoire d'énergétique solaire - Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud  
**URL:** <http://iawww.epfl.ch>, <http://www.eivd.ch>,  
<http://iawww2.epfl.ch>, <http://solarplant.eivd.ch>

**Titre du projet:** **Optimisation d'installations solaires combinées**

### Résumé

Les installations solaires combinées sont des systèmes qui permettent à la fois le chauffage de l'eau sanitaire et le chauffage d'un bâtiment. L'installation Arpège considérée dans cette étude est commercialisée par l'entreprise AGENA Energies SA<sup>1</sup>. Cette installation peut être couplée à une surface de 8 à 16 m<sup>2</sup> de capteurs solaires thermiques. Sa source d'appoint fossile est à gaz ou à mazout selon les versions. Afin d'en optimiser les performances, des modifications structurelles et des améliorations de la commande sont considérées.

Une installation située dans le laboratoire de l'EIVD et une autre installée dans une maison individuelle ont aidé à identifier les paramètres du modèle dynamique de cette installation. Les simulations effectuées avec le logiciel TRNSYS ont permis de déterminer les gains potentiels de certaines modifications structurelles. En combinant toutes les améliorations déjà réalisées avec celles qui sont envisageables à moyen terme, il est possible de réaliser un gain d'environ 10 à 12 % sur la consommation de mazout ou de gaz par rapport à un système Arpège d'origine.

La mise en œuvre d'une stratégie de commande avancée permet de diminuer encore la consommation d'énergie fossile en adaptant la méthodologie développée dans [1]. La stratégie de commande repose sur le contrôle optimal des différentes variables manipulées. Ces variables manipulées sont le débit dans le circuit capteur, la puissance de chauffage de l'appoint auxiliaire d'énergie et les différentes grandeurs qui permettent d'influencer la puissance dissipée dans les convecteurs (débit de liquide dans les convecteurs et degré d'ouverture d'une vanne trois voies). Cette stratégie de commande avancée est de type prédictif avec utilisation de données météorologiques fournies en ligne par l'Institut Suisse de Météorologie<sup>2</sup> (ISM).

---

<sup>1</sup> Le Grand Pré, CH-1510 Moudon

<sup>2</sup> Kräbühlstrasse 58, Boîte postale, CH-8044 Zürich

## 1 Objectifs

Pour améliorer une installation solaire combinée comme la centrale Arpège, quatre grandes étapes successives sont considérées:

- Modélisation complète d'une maison solaire (section 2.1), incluant le bâtiment et l'installation Arpège [2];
- Mesures d'une installation en laboratoire ou in-situ afin de pouvoir ajuster les paramètres du modèle mathématique (section 2.2);
- Simulation de l'installation et validation;
- Propositions et réalisation d'améliorations, en concertation avec le partenaire industriel.

Le chapitre 2 présente l'état actuel de réalisation des objectifs précités. Ainsi, l'émulateur solaire développé pour valider la modélisation est décrit à la section 2.3. Quant aux améliorations structurelles de l'installation dont certaines peuvent être rapidement mis en œuvre par le fabricant, elles sont présentées à la section 2.4. Finalement, la nouvelle stratégie de commande proposée est détaillée à la section 2.5. Cette stratégie de commande avancée n'est pour l'instant validée qu'en simulation.

## 2 Travaux effectués et résultats obtenus durant l'année 2000

### 2.1 MODELISATION

#### 2.1.1 Modélisation du système Arpège

La méthode adoptée pour la modélisation du système Arpège est très classique. Tous les volumes de liquide de l'installation ont été divisés en un certain nombre de couches, ceci afin de transformer les équations différentielles aux dérivées partielles en équations différentielles aux dérivées ordinaires, c'est-à-dire sans dépendance spatiale explicite. Au final, il y a donc autant d'équations différentielles que de couches. Un bon modèle de simulation requiert un très grand nombre de couches. Comme le modèle fait partie intégrante de la stratégie de commande avancée, il convient néanmoins de trouver un nombre de couches qui correspond à un bon compromis entre la précision du modèle et sa complexité.

Une vue schématique du système Arpège est donnée à la figure 1. Sur cette figure apparaît également la découpe choisie pour la modélisation.

Pour des raisons de place, les équations différentielles pour chacune de ces couches ne sont pas données. Elles sont au nombre de 48:

- 13 noeuds pour la cuve.
- 10 noeuds pour le circuit d'eau chaude sanitaire.
- 18 noeuds pour le circuit collecteur, dont trois pour les capteurs solaires.

• 7 noeuds pour le circuit de chauffage, dont un seul pour le radiateur.

Elles sont détaillées dans [2].

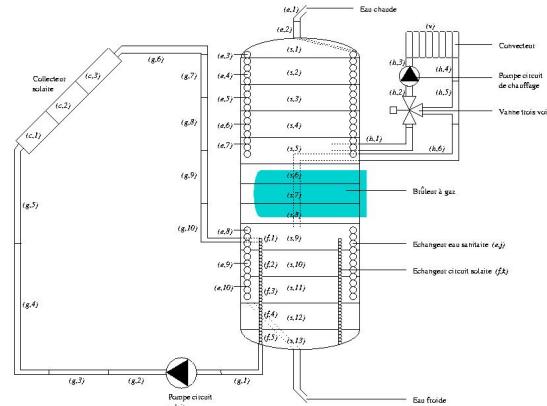


Figure 1: Système Arpège et modélisation.

#### 2.1.2 Modélisation du bâtiment

Le bâtiment à modéliser choisi est un des bâtiments de référence de la tâche 26 de l'AIE. Ces bâtiments de référence sont utilisés pour comparer les performances des différentes systèmes combinés disponibles sur le marché européen. Parmi les trois bâtiments proposés, le bâtiment intermédiaire a été choisi. Il correspond à une demande en chauffage de  $60 \text{ kWh} / \text{m}^2 \cdot \text{an}$ .

Le principe adopté pour la modélisation du bâtiment est le même que celui utilisé pour la modélisation du système combiné Arpège. En effet, toutes les fenêtres et tous les murs ont été découpés dans le sens de l'épaisseur. Les spécifications données par l'AIE concernant la composition de chaque couche sont très précises. Ceci a permis de trouver sans difficulté dans des catalogues les caractéristiques thermiques des différentes couches. Les équations différentielles obtenues pour chacune de ces couches correspondent à un simple bilan de puissance.

De la même manière, le nombre de personnes dans le bâtiment, les gains internes de base et les taux d'occupation sont spécifiés par cette même tâche.

Un seul noeud décrit le comportement thermique de l'air dans la maison. Il y a en tout 41 noeuds pour ce modèle.

#### 2.1.3 Synthèse

Il est évident qu'il existe de fortes interactions entre le bâtiment et le système Arpège. En effet, la température de l'air dans le bâtiment influence la température du retour chauffage dans le système Arpège. Ce même système Arpège a quant à lui une influence sur la température aller de chauffage qui conditionne en partie la puissance dissipée par le convecteur dans la maison.

À certains stades de conception de la commande avancée, il convient donc de combiner le modèle du

bâtiment et celui du système Arpège en un seul et même modèle global. Ce modèle global compte en tout 89 variables d'état.

Le débit dans le circuit capteur, la puissance de chauffage du brûleur à gaz, le débit dans la boucle de chauffage et le degré d'ouverture de la vanne trois voies représentent les grandeurs qui peuvent être manipulées de façon à satisfaire les objectifs de confort et d'économie d'énergie souhaités. Ce sont ces grandeurs qui sont ajustées au niveau de l'étage de commande.

L'ensoleillement, la température ambiante autour du collecteur, la température ambiante autour de la cuve, les besoins en eau chaude sanitaire et le nombre de personnes dans le bâtiment ainsi que leur taux d'occupation sont des grandeurs qui ont une influence sur le comportement de l'installation mais qui ne peuvent pas être manipulées. Elles sont appelées perturbations et doivent être estimées dans le cadre d'une approche de type commande prédictive.

## 2.2 MESURES IN-SITU D'UNE INSTALLATION ARPEGE

Afin de pouvoir déterminer les rendements du système combiné Arpège dans une situation d'utilisation réelle, nous analysons depuis l'été 1999 une installation placée dans une maison familiale à Dombresson (NE, Alt. 750 m). Dans le précédent mandat<sup>1</sup>, nous avions mis en évidence un taux d'économie d'énergie d'appoint (fractional energy saving, abrégé  $f_{sav}$ ) d'environ 25 % par rapport à une chaudière moderne ( $\eta_{annuel} = 85 \%$ ) sans apport solaire.

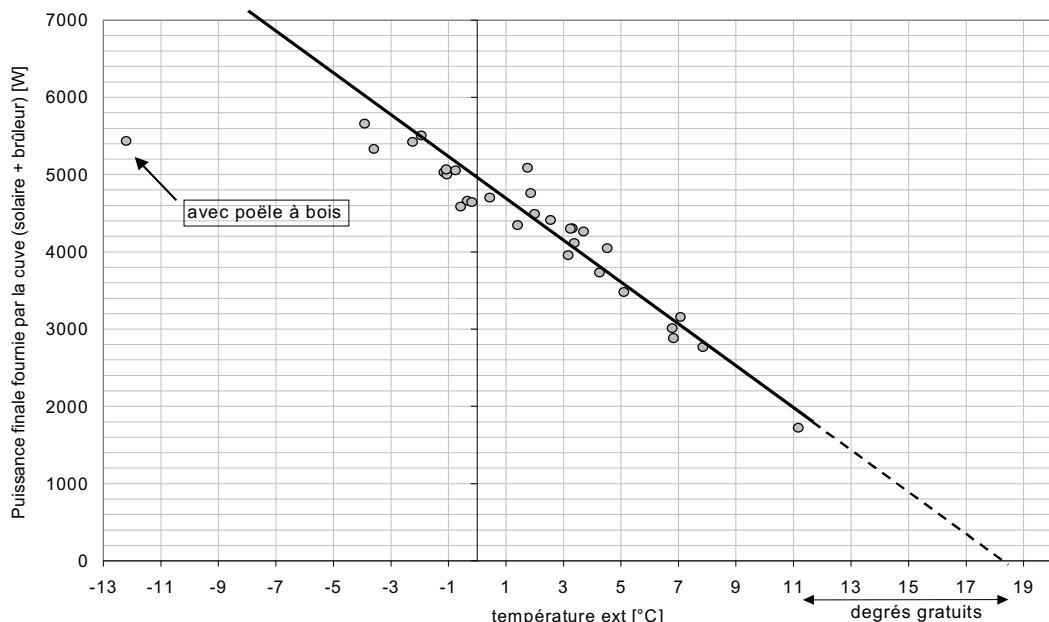


Figure 2. Signature énergétique de la maison familiale étudiée à Dombresson (chaque point représente une moyenne sur 4 jours).

<sup>1</sup> DIS C N°: 66503 [3], Chap. 7

Ce résultat avait été obtenu par simulation annuelle avec le logiciel TRNSYS à partir des données Météonorm et d'une demande d'énergie chauffage de 55 kWh / m<sup>2</sup> · an.

$$f_{sav} = 1 - Q_{app} / Q_{app,réf} \quad \text{avec:}$$

- $Q_{app}$ : énergie fossile d'appoint fournie à l'installation solaire.
- $Q_{app,réf}$  énergie fossile d'appoint fournie à l'installation conventionnelle de référence dépourvue d'apport solaire.

Les mesures effectuées durant la période hivernale 1999-2000 ont permis de déterminer la signature énergétique de la maison et de connaître plus précisément sa demande énergétique. Nous avons pu déterminer les valeurs suivantes à partir de la figure 2:

- Pertes spécifiques de la maison = 267 W/K
- Puissance de chauffage à 0 °C = 4950 W
- Température ambiante moyenne = 18.5 °C
- Température au point  $P_0 = 18.5$  °C
- Degrés-jours (18 °C / 11.2 °C) à Dombresson = 3831 °C · jours<sup>2</sup>
- Nombre de jours de chauffage à Dombresson (18.5 °C / 11.2 °C) = 247 jours<sup>2</sup>
- Température moyenne extérieure pendant la période de chauffage = 3.4 °C
- Surface de référence énergétique = 142 m<sup>2</sup>

Indice de dépense énergétique chauffage  
**100 kWh / m<sup>2</sup> · a**

<sup>2</sup> Recalculé à partir de Météonorm (20 °C / 12 °C)

Le taux de renouvellement de l'air dans cette maison est environ 3 à 4 fois plus élevé que la valeur que nous avions estimé ( $1 \text{ h}^{-1}$  au lieu de  $0.3 \text{ h}^{-1}$ ). Ceci permet d'expliquer la différence importante entre l'indice de dépense énergétique mesuré de  $100 \text{ kWh} / \text{m}^2 \cdot \text{an}$  et celui calculé de  $55 \text{ kWh} / \text{m}^2 \cdot \text{an}$ . Nous avons dès lors corrigé la valeur de dépense énergétique de la maison dans les simulations. La comparaison entre les mesures et la simulation effectuée avec TRNSYS montre une assez bonne correspondance (Fig. 3) pour les mois de juillet à novembre 2000.

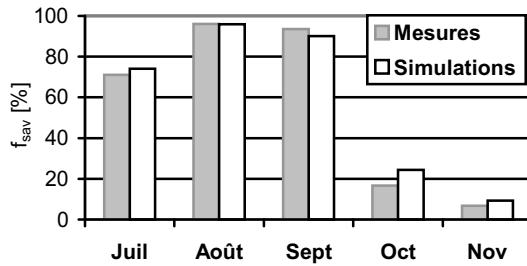


Figure 3. Graphique comparatif du taux d'économie d'énergie d'appoint ( $f_{\text{sav}}$ ) en % pour la période mesurée entre juillet et novembre 2000 à Dombresson.

Les mesures hivernales de novembre 1999 à mars 2000 nous ont permis de constater que la couverture neigeuse des mois de décembre et de janvier n'a pas permis aux capteurs de fournir de l'énergie. En simulant une année complète (sur la base des données Meteonorm) et en tenant compte d'un apport solaire nul pour ces 2 mois, nous obtenons un  $f_{\text{sav}}$  annuel calculé à partir des simulations de 21 %; 88 % pendant la période de non chauffage (juin-sept.) et 16 % pour la période de chauffage (Fig. 4). La production solaire nette des capteurs est de  $340 \text{ kWh} / \text{m}^2 \cdot \text{an}$  (orientation de  $45^\circ$  SO, inclinaison de  $35^\circ$ ).

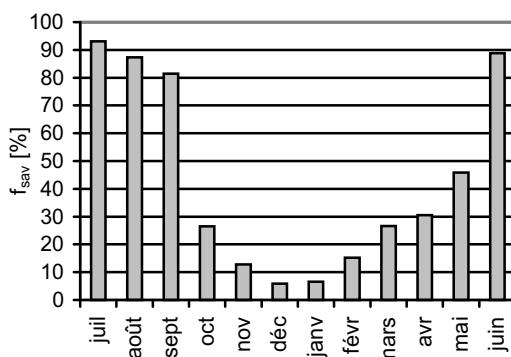


Figure 4. Taux d'économie d'énergie d'appoint calculé à partir de **simulation** avec les données de Meteonorm pour la maison de Dombresson (soutirage moyen ECS de  $7.5 \text{ kWh/jour}$ , référence : chaudière  $\eta = 85\%$ ).

En extrapolant à partir des relevés effectués sur les compteurs entre avril et juin 2000<sup>1</sup>, la figure 5 montre

en comparaison le  $f_{\text{sav}}$  mensuel calculé pour la période de juillet 1999 à novembre 2000.

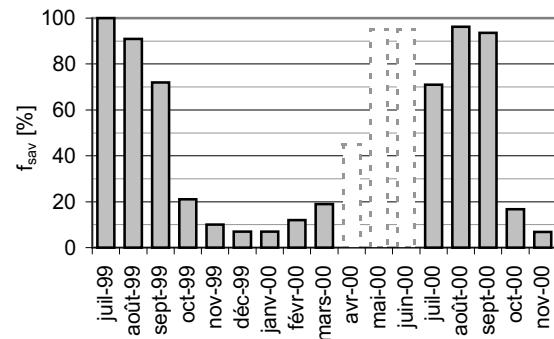


Figure 5. Taux d'économie d'énergie d'appoint calculé à partir des **mesures** relevées à Dombresson entre juil. 1999 et nov. 2000 (soutirage moyen ECS de  $7.3 \text{ kWh/jour}$ ).

Nous obtenons un  $f_{\text{sav}}$  annuel calculé à partir des mesures de  $18 \pm 2\%$ . L'ensoleillement pendant la période d'avril 2000 à juin 2000 a été exceptionnel. Le brûleur ne s'est enclenché qu'une dizaine fois entre mi avril et fin juin (pas de chauffage). Il y a donc presque eu l'autonomie solaire pendant cette période. A contrario, le mois de juillet 2000 a été particulièrement mauvais. Ces résultats démontrent la limite de la comparaison mensuelle avec des simulations basées sur une météo moyenne.

### 2.3 ÉMULATEUR SOLAIRE

L'étude d'une installation solaire en laboratoire rend l'expérimentation tributaire des conditions météorologiques du lieu. Ceci implique des difficultés pour comparer les performances d'une installation avant et après des modifications. Cette comparaison est envisageable seulement sur une période de longue durée avec irradiations semblables.

Il apparaît intéressant d'utiliser un émulateur solaire reproduisant l'apport thermique que fourniraient des capteurs solaires. Un scénario météorologique peut être réalisé et reproduit à volonté. Il est alors possible de réaliser des mesures comparatives sur une courte période (1 à 6 jours selon le but du test) dans des conditions hivernales ou estivales.

L'émulateur solaire réalisé à l'EIVD a une reproductibilité comprise entre 1 et 2 % sur l'apport d'énergie solaire. L'erreur ainsi commise sur l'énergie-chaleur annuelle fournie par des capteurs correspond à moins de 1 % de la demande en chauffage et ECS.

Une telle installation complète le stand d'essais du laboratoire de l'EIVD comprenant déjà un système de ventilo-convecteurs pour simuler la demande en chauffage d'une maison familiale. Ainsi, en couplant les mesures réalisées au laboratoire avec les simulations<sup>3</sup> par ordinateur, il sera possible en 2001 de valider les améliorations apportées au système solaire combiné Arpège.

<sup>1</sup> problèmes d'acquisition de mesures du 4 avril au 27 juin 2000.

<sup>3</sup> Simulations réalisées avec le logiciel TRNSYS

## 2.4 OPTIMISATION STRUCTURELLE

Dans le cadre de la tâche 26 de l'AIE une comparaison de systèmes solaires combinés est en cours de réalisation. Le but de cette tâche est de classifier les systèmes solaires combinés et de souligner les concepts performants afin de les optimiser. Les simulations sont réalisées avec le même type de bâtiment, la même station météorologique et le même type de capteur. Dans le présent rapport, la simulation de "référence" est basée sur les paramètres de la tâche 26 à l'exception des capteurs. Les paramètres sont les suivants:

- Capteurs Azur 6 (AGENA Energies) - 12 m<sup>2</sup>
- Météorologie de Zürich (selon Meteonorm)
- Maison d'indice énergétique pour le chauffage de 60 kWh / m<sup>2</sup> · a.

• Consommation moyenne d'ECS de 8.3 kWh/jour

Durant l'année 2000, nous avons réalisé des modifications structurelles sur l'installation Arpège proposées lors du précédent mandat [3] (isolation supplémentaire, chicanes anti-convectives sur les sorties de chauffage, brise-jet sur la conduite retour chauffage). Afin de confirmer le bien fondé de ces améliorations, nous avons caractérisé les paramètres de l'installation en vue de définir les nouvelles performances par simulation. Les mesures ont montré que les pertes thermiques de la cuve ont évolué d'une valeur initiale de 9.6 W/K à 6.4 W/K. En conséquence, le  $f_{sav}$  est passé de 25.6 % à 28.5 %. Ce gain correspond à l'installation de référence avec une surface de capteurs de 15 m<sup>2</sup> au lieu de 12 m<sup>2</sup>.

Nous avons réalisé d'autres simulations en modifiant certains paramètres.

*Modification A.* Des débits plus ou moins élevés ont été simulés pour le circuit solaire (débit maxi = 25 à 40 l/h · m<sup>2</sup>). La régulation d'Arpège permet de moduler ce débit entre une valeur de base et une valeur maximale en fonction de la différence de température entre le bas de la cuve et les capteurs (fig. 6).

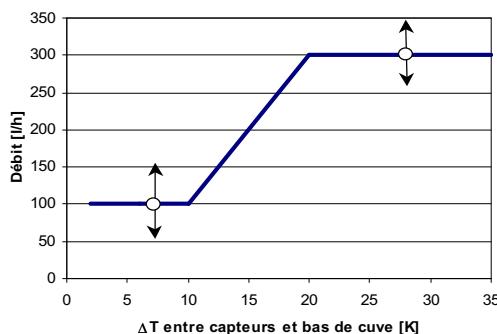


Figure 6. Évolution possible du débit dans le circuit solaire.

*Modification B.* La régulation d'Arpège permet également de modifier la consigne régissant l'enclenchement du circulateur solaire. Cette consigne est la différence de température entre le

bas de la cuve et les capteurs au-delà de laquelle la pompe de circulation fonctionne.

*Modification C.* La position de la sonde qui est située en bas de cuve influence l'enclenchement et le déclenchement du circulateur solaire. Elle est située à une hauteur de 30 cm depuis le bas de la cuve. En faisant varier cette position vers le bas, il ressort qu'un optimum se situe à 10 cm depuis le fond de la cuve (soit 20 cm plus bas que la position actuelle).

*Modification D.* Position du brûleur et des sorties pour le circuit de chauffage: les simulations montrent un gain maximum du  $f_{sav}$  lors d'un déplacement de 10 cm du tout au-dessus de la position actuelle.

*Modification E.* L'influence de la sonde d'ambiance sur la température de consigne de l'aller chauffage est un des paramètres de la régulation d'Arpège. La plage de variation est comprise entre 0 et 150 %. Dans le tableau de la figure 7, le gain est rapporté au passage de 100 à 150 %.

*Modification F.* Pour diminuer les pertes thermiques en bas de cuve, nous proposons d'adoindre des chicanes anti-convectives sur les sorties du circuit solaire, de les isoler et d'intercaler une planche en bois sous le socle de la cuve. Ainsi, les pertes thermiques de la cuve devraient être en moyenne de 5 W/K (précédemment 6.4 W/K).

*Modification G.* L'inertie thermique des capteurs a une influence sur les performances de ces derniers. En effet, avant d'atteindre la température de fonctionnement, toute la masse des capteurs remplis d'eau doit monter en température. Dans ce rapport, nous avons simulé l'effet d'une diminution d'un facteur 4 de l'inertie thermique des capteurs. Il est à noter que de tels capteurs sont techniquement envisageables.

*Modification H.* Le rendement de combustion du brûleur à condensation est fonction de la quantité d'eau condensée. Cette quantité augmente lorsque l'efficacité de l'échangeur de chaleur croît. La différence de température entre les gaz de fumée et la température de l'eau autour de l'échangeur est actuellement de 15 K. Dans le tableau de la figure 7, nous avons simulé un  $\Delta T$  de 10 K. Cette valeur est réaliste au vu des performances de certaines chaudières.

*Modification I.* Actuellement, l'énergie solaire est stockée dans la cuve par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur situé dans la partie basse de cette dernière. La stratification dans toute la cuve de la charge solaire permet d'augmenter les performances de l'installation.

Les modifications de paramétrage de la régulation standard ont un surcoût nul. Toutefois, il ressort de nos simulations que les modifications A et B n'ont pas ou peu d'influence. Les modifications

structurelles doivent tenir compte du rapport surcoût/gain.

N° de modif.	Type de modification	Gain potentiel sur $f_{sav}$ en point
A	Débit du circuit solaire	négligeable
B	Enclenchement du circuit solaire	négligeable
C	Position de la sonde bas de cuve	0.15
D	Position du brûleur	0.7
E	Influence sonde d'ambiance	0.6
F	Pertes thermiques bas de la cuve	1
G	Inertie thermique des capteurs	1.2
H	Rendement de combustion	0.9
I	Stratification de la charge solaire	3

Figure 7. Tableau récapitulatif des modifications simulées et les gains en point sur le  $f_{sav}$  par rapport à la simulation de référence ( $f_{sav} = 28.5\%$ ).

Des simulations ont été effectuées en intégrant plusieurs modifications à la fois (fig. 8). En effet, les gains ne sont pas systématiquement cumulables.

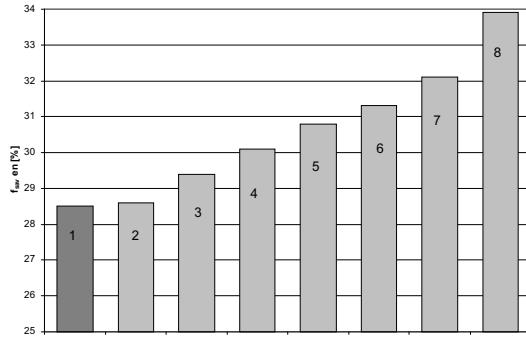


Figure 8. Évolution de  $f_{sav}$  selon différentes variantes.

1. simulation de "référence" Arpège 2000
2. réf.+ modification C
3. réf.+ modifications C et D
4. réf.+ modifications C, D et F
5. réf.+ modifications C, D, E et F
6. réf.+ modifications C, D, E, F et G
7. réf.+ modifications C, D, E, F, G et H
8. réf.+ modifications C, D, E, F, G, H et I

## 2.5 COMMANDE AVANCEE

La stratégie de commande avancée basée sur la technique *ILC*: *Iterative Learning Control* est présentée dans ce chapitre. L'aspect prédictif de cette approche provient de la prise en compte des estimations d'ensoleillement et de charges futures.

### 2.5.1 Problématique

Le modèle du bâtiment est habituellement utilisé pour simuler la température de l'air ambiant à l'intérieur de la maison, ceci pour un régime donné de chauffage et sous certaines perturbations climatiques. La simulation est effectuée en une passe, sans répétition.

La problématique inverse, à la base de l'approche *ILC*, consiste à déterminer en plusieurs passes successives (itérations) le profil de température aller du circuit de chauffage qui engendrerait une température ambiante intérieure désirée. Ce profil de température dans la maison doit par conséquent être explicitement spécifié<sup>4</sup>.

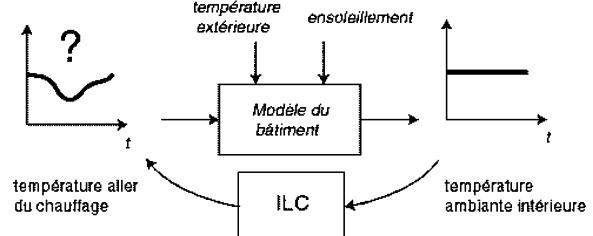


Figure 9. Principe de l'approche ILC.

De même, le profil de puissance peut être calculé itérativement de manière à satisfaire simultanément:

- la demande en chauffage, dont le profil a été déterminé précédemment.
- la demande en eau chaude sanitaire, dont la température doit être constamment maintenue au dessus d'un certain seuil (50°C dans notre exemple).

### 2.5.2 Principe de base

Pour utiliser une stratégie basée sur l'apprentissage itératif *ILC*, il faut avant tout définir de quelle façon le système opère de manière répétitive. Dans notre cas, chaque cycle consiste simplement à intégrer numériquement les équations différentielles du modèle dans un horizon de simulation donné (typiquement une journée) à partir de certaines conditions initiales et sous l'effet d'un profil de commande virtuelle  $u_k(t)$  à déterminer.

Les itérations reposent sur l'algorithme suivant:

$$u_{k+1} = u_k + \Gamma_e [y_d(t+h) - y_k(t+h)]$$

L'indice  $k$  représente le nombre d'itérations successives effectuées pour affiner le profil de commande. Notons seulement que l'introduction d'un horizon  $h$  de l'ordre de grandeur de la constante de temps dominante du système provoque un effet dérivateur. À chaque intégration du système le long de l'intervalle de simulation, les profils d'entrée et de sortie, respectivement  $u_k(t)$  et  $y_k(t)$  sont conservées en mémoire. L'algorithme évalue alors l'écart de performance  $e_k(t) = y_d(t) - y_k(t)$ , où  $y_d(t)$  est la sortie désirée du système. Basé sur ce signal d'erreur, l'algorithme calcule un nouveau signal d'entrée  $u_{k+1}(t)$ , qui est mis en mémoire pour être utilisé à la prochaine exécution (simulation).

<sup>4</sup> Dans le futur, ce profil de température pourrait être calculé et optimisé de manière à tirer profit des gains solaires.

Le nouveau profil de commande est choisi de manière à garantir la diminution de l'écart au cycle suivant. Le but de la commande est de trouver itérativement le signal  $u^*(t)$  tel que:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} f_p(u_k^*(t), t) = y_n(t)$$

### 2.5.3 Exemple

Pour valider la commande, nous devons prendre en compte les conditions climatiques et le soutirage en ECS (Figure 10). Les conditions climatiques choisies correspondent à la mi-saison (fraîcheur et ensoleillement).

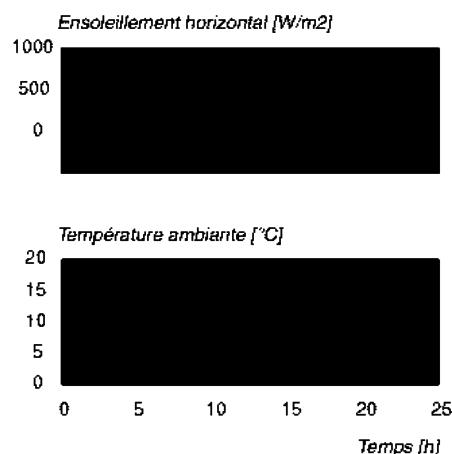


Figure 10. Profil des perturbations climatiques.

Nous disposons pour cela de la température et de l'ensoleillement de la ville de Zurich, ville référence pour la Suisse.

Le profil de soutirage utilisé pour la simulation représente une demande journalière de 10 KWh (Figure 11).

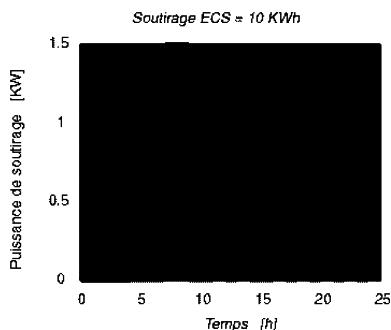


Figure 11. Profil de soutirage typique.

Le profil de température au départ du chauffage obtenu pour ces conditions de simulation est représenté à la figure 12. L'effet de l'ensoleillement apparaît clairement au cours de l'après-midi.

Ce profil de chauffage permet de maintenir une température dans la maison proche de la consigne de 20 °C.

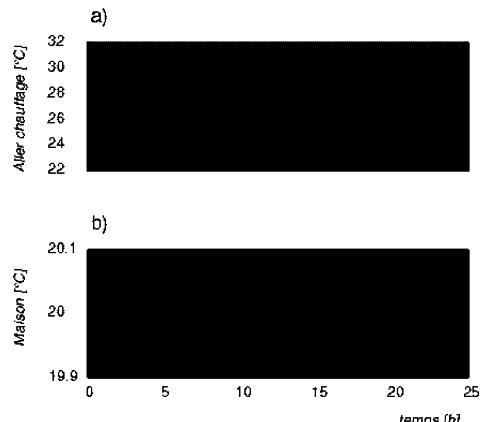


Figure 12. Profils de température. a) aller du chauffage, b) dans la maison.

De la même façon, le profil de puissance obtenu permet de maintenir une température en haut de cuve supérieure à 50 °C (Figure 13).

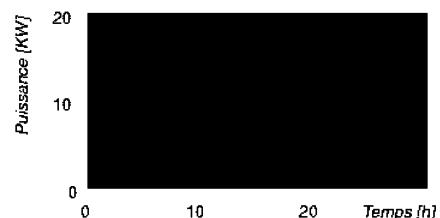


Figure 13. Profil de puissance du brûleur.

Le profil de température obtenu en haut de cuve est représenté en trait épais à la figure 14.

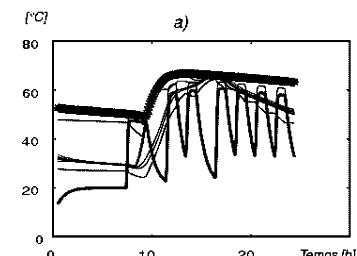


Figure 14. Températures de l'ECS.

On remarque que grâce à l'ensoleillement, l'énergie auxiliaire n'a été sollicitée que pour couvrir les besoins en eau chaude sanitaire de la matinée, tout en maintenant la température de celle-ci en dessus des 50°C. Dès la fin de la matinée, l'apport de chaleur obtenu via le circuit solaire couvre l'ensemble des besoins énergétiques (eau chaude + chauffage). L'élévation de température dans la cuve est mise en évidence à la figure 15.

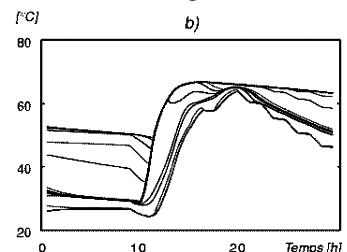


Figure 15. Températures dans la cuve.

Il est bon de mentionner que le profil de puissance obtenu est étroitement lié à l'état initial de la cuve.

Pour ces simulations, le débit dans le collecteur solaire a été réglé proportionnellement à l'ensoleillement<sup>5</sup>. Le débit maximum correspondant est optimisé de manière à maximiser le transfert d'énergie solaire dans la cuve.

### 3 Collaborations

Ce projet est réalisé dans le cadre d'une collaboration entre l'Institut d'automatique de l'EPFL et le Laboratoire d'énergétique solaire de l'EIVD.

Les tâches de modélisation traitées dans ce projet correspondent à la contribution suisse pour la tâche 26 de l'AIE. Ce contexte est propice au maintien des contacts entre les différents intervenants à ce programme.

### 4 Transferts

Le transfert industriel est réalisé grâce aux contacts réguliers entretenus entre le groupe de l'EIVD et l'entreprise AGENA.

Une partie des travaux de modélisation, en particulier ceux qui sont relatifs au bâtiment, ont été sous-traités à l'entreprise Estia. La participation à toutes les séances de coordination technique de M. Bauer, représentant de cette entreprise, favorise également un transfert immédiat de l'expertise développée dans le projet.

### 5 Perspectives

La figure 16 résume les diverses performances de l'installation d'Arpège passées et à venir. Il est à noter que ces perspectives ne prennent pas encore en compte le gain potentiel apporté par la commande avancée décrite à la section 2.5.

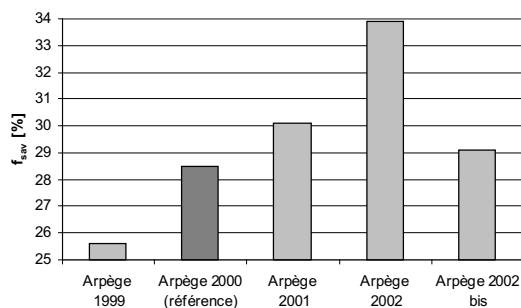


Figure 16.  $f_{sav}$  selon la variante choisie.

La nomenclature de la figure 16 est la suivante:

- Arpège 1999: Installation reçue en 1999.
- Arpège 2000: Installation modifiée en 2000; "référence" (isolation supplémentaire, chicane anti-convective et brise-jet).

- Arpège 2001: Installation avec modifications prévues en 2001 (isolation bas de cuve et augmentation de l'influence de la sonde d'ambiance).

- Arpège 2002 : Installation intégrant la plupart des modifications (C, D, E, F, G, H, I).

- Arpège 2002 bis : Installation "2002" avec 8 m<sup>2</sup> de capteurs (au lieu de 12 m<sup>2</sup>).

Pour les modifications légères, l'émulateur solaire permettra de confirmer le résultat des simulations. En 2001, nous testerons les modifications E et F.

Il est évident que nous n'avons pas exploré toutes les possibilités de modifications (dimensionnement des échangeurs de chaleur, sondes de température supplémentaires...). De plus, il faut tenir compte du facteur coût des modifications proposées. Actuellement, le coût des modifications réalisées en 2000 est négligeable comparé au coût global de l'installation. Ces améliorations permettent d'économiser environ 3 m<sup>2</sup> de capteurs pour un  $f_{sav}$  identique.

La version Arpège "2002" aurait un surcoût plus important. En contrepartie, elle permettrait d'avoir les mêmes performances qu'Arpège 2000 avec plus de 4 m<sup>2</sup> de capteurs en moins (fig. 16 version 2002 bis). Il apparaît intéressant de tester ces modifications structurelles lourdes et d'estimer leur surcoût.

### 6 Publications et bibliographie

- [1] T. Prud'homme and D. Gillet. Optimisation of solar domestic hot water systems. In *EuroSun'98*, volume 2, Portoroz, 1998.
- [2] L. Pedrinis. Travail de diplôme: Modélisation d'une installation solaire combinée eau chaude-chauffage. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), DGM-IA, Écublens, CH-1015 Lausanne, Suisse, Mars 2000.
- [3] J. Bony et O. Renoult, Installations solaires combinées pour villas: Optimisation eau chaude, chauffage et climatisation. Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale (HESSO), EIVD, LES, Rte de Cheseaux 1, CH-1400 Yverdon-les-Bains, Suisse, Décembre 1999.
- [4] T. Prud'homme and D. Gillet, "Advanced Control Strategy of a Solar Domestic Hot Water System with a Segmented Auxiliary Heater", *Energy and Buildings Special Issue CISBAT'99*.

<sup>5</sup> Cette proposition a été validée sur une autre installation, le KitSol.