

SUIVI ET ÉVALUATION ÉNERGÉTIQUES DU PLAN SOLEIL

CHAUFFE-EAU SOLAIRES INDIVIDUELS

Synthèse du programme

Carol BUSCARLET et Dominique CACCAVELLI

RÉSUMÉ

Pour connaître les performances réelles des chauffe-eau solaires individuels (CESI) installés dans le cadre du programme Plan Soleil et pour évaluer quantitativement le bénéfice énergétique effectivement obtenu et l'impact environnemental, près de 120 installations ont été instrumentées et suivies sur une année dans quatre régions. Vingt d'entre elles ont fait l'objet d'un suivi plus fin dans le temps par télé-relevés journaliers.

On connaît maintenant approximativement l'impact énergétique et environnemental du volet CESI du programme Plan Soleil : à la fin 2005 il a évité le rejet dans l'atmosphère d'environ 13 000 tonnes de CO₂. Les performances des chauffe-eau solaires (sauf le taux de couverture solaire) ne semblent pas dépendre significativement de la région et donc du climat. **Parmi les principaux autres résultats on retiendra les faits marquants suivants :**

- Les températures réelles d'eau froide sont moins basses que dans les données utilisées habituellement.
- La consommation d'eau chaude moyenne est de 120 litres à 50 °C par jour par installation soit 33 litres par personne en moyenne (un peu plus en P.A.C.A.).
- La productivité est d'environ 200 kWh par m² de capteur solaire.
- Les installations sont dans l'ensemble surdimensionnées (surface de captage et volume de stockage) ce qui entraîne un coût d'installation plus important que nécessaire et conduit à une productivité faible et des consommations d'appoint supplémentaires.
- Les économies réalisées dépendent de la consommation d'eau chaude et aussi de la gestion de l'appoint, notamment de sa température de consigne.

Les performances observées sont en fin de compte un peu décevantes et montrent que des optimisations des systèmes sont nécessaires pour obtenir une meilleure rentabilité. En particulier la diminution du dimensionnement (capteurs solaires, volume de stockage solaire et volume d'appoint) pourrait permettre une réduction des coûts des systèmes, une meilleure gestion à la fois de la boucle solaire et de l'appoint pourrait améliorer sensiblement leurs performances.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT

ÉTABLISSEMENT DE SOPHIA-ANTIPOLIS | 290 ROUTE DES LUCIOLES | BP 209 | 06904 SOPHIA-ANTIPOLIS CEDEX
TÉL. (33) 04 93 95 67 00 | FAX. (33) 04 93 95 67 33 | SIRET 775 688 229 000 68 | www.cstb.fr

SIÈGE SOCIAL > 84 AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2

ÉTABLISSEMENT PUBLIC À CARACTÈRE INDUSTRIEL ET COMMERCIAL | RCS MEAUX 775 688 229 | TVA FR 70 775 688 229

MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

1 INTRODUCTION - OBJECTIFS DE LA CAMPAGNE DE MESURE

Dans le cadre du programme Plan Soleil, l'ADEME a attribué de 2000 à 2004 des aides financières aux acquéreurs de chauffe-eau solaire individuel (CESI). Pour analyser l'impact énergétique et environnemental de ce programme pour cette application, 120 CESI ont été instrumentés et suivis sur une période minimale de 12 mois.

Cette campagne expérimentale, menée sur une large échelle sous la responsabilité du CSTB, avait comme objectifs :

- de mesurer les performances thermiques réelles d'un échantillon de chauffe-eau solaires installés dans le cadre du programme Plan Soleil sur des bases scientifiques solides et neutres,
- d'évaluer quantitativement le bénéfice énergétique ainsi que l'impact environnemental de ce programme pour l'application CESI,
- également de mieux connaître les comportements des usagers (besoins en eau chaude, profils de puisage) et d'apprécier ainsi le dimensionnement de ces installations.

2 ORGANISATION DE LA CAMPAGNE DE MESURE

L'ADEME a été le principal commanditaire de la campagne de mesures. EDF, GDF ainsi que le CSTB ont également participé au financement. Le CSTB a contribué à la préparation de la campagne, l'a supervisée puis en a établi la synthèse. Les installations suivies sont réparties dans quatre régions, Languedoc-Roussillon, Alsace, Provence-Alpes-Côte-d'Azur et Rhône-Alpes. Dans chaque région deux opérateurs locaux (un seul en Rhône-Alpes) ont été chargés de l'instrumentation et des relevés. Ces opérateurs ont été choisis après appels d'offre restreints.

L'étude statistique des bases de données de l'ADEME a permis d'identifier 120 installations à suivre de manière à ce que dans chaque région, l'échantillon suivi soit assez représentatif du parc existant en ce qui concerne la taille des CESI, l'énergie d'appoint et la marque. Les installations suivies devaient également avoir été préalablement « auditées » par des inspecteurs indépendants (voir l'article « audits CESI »).

3 INSTRUMENTATION

Les installations ont été équipées d'un compteur de chaleur avec indication du volume en sortie du ballon solaire. En cas de chauffe-eau solaire à appoint intégré, était ajouté un compteur d'énergie sur l'appoint - compteur électrique (double tarif, le cas échéant) pour un appoint électrique, compteur de chaleur pour un appoint par échangeur (chaudière au gaz ou au fioul). Les compteurs de même nature sont tous du même modèle. Les opérateurs recueillaient les relevés mensuels des compteurs auprès des usagers par téléphone ou courrier (postal ou électronique).

Parmi les installations instrumentées, 20 (5 par région) ont fait l'objet d'un suivi plus fin dans le temps par télé relevés journaliers (instrumentation de niveau 2, l'instrumentation de base étant le niveau 1). L'équipement supplémentaire nécessaire se composait d'un système d'acquisition et de télétransmission, d'une ligne téléphonique dédiée, de thermocouples pour mesurer les températures d'eau chaude et froide et la température ambiante du local où était situé le ballon solaire, d'un système de comptage sur la pompe solaire.

L'instrumentation de niveau 1 a été sous-traitée aux opérateurs locaux. L'instrumentation de niveau 2 a été réalisée et gérée directement par le CSTB.

4 DEROULEMENT DE LA CAMPAGNE

Après une phase de définition et validation du cahier des charges et de la méthodologie en 2001 et 2002, la campagne de mesures a commencé début 2003. Les premiers suivis ont démarré dans l'été 2003 en Languedoc-Roussillon, puis en automne en PACA et en Alsace. En Rhône-Alpes, ils ont commencé plus tardivement (début 2004), cette région ayant finalement remplacé Midi-Pyrénées, prévue initialement.

Trente installations ont été instrumentées dans chaque région sauf en Rhône-Alpes où seules 26 ont pu l'être, du fait de problèmes d'organisation.

Parmi les 116 installations instrumentées, 91 donnent des résultats complètement exploitables. Les relevés incomplets concernent des installations où l'opérateur n'a pu collecter qu'un nombre insuffisant de relevés mensuels pour diverses raisons (absence ou mauvaise volonté de l'utilisateur, installations instrumentées trop tard). Les relevés douteux sont des relevés qui donnent des résultats incohérents, soit par suite d'erreurs de lecture soit parce que l'instrumentation était mal faite sans que l'opérateur s'en soit aperçu. Instrumentation défectueuse signifie soit qu'un compteur est tombé en panne, soit qu'il a été mal posé, ce défaut n'ayant pas été corrigé du tout ou pas assez tôt.

	Languedoc-Roussillon	Alsace	PACA	Rhône-Alpes
installations instrumentées	30	30	30	26
relevés incomplets	1	3	3	4
relevés douteux / instrumentation défectueuse	4	2	3	5
installations exploitables	25	25	24	17

Les 20 suivis de niveau 2 prévus ont tous été réalisés.

5 METHODE D'EXPLOITATION DES MESURES

Pour traiter de manière homogène les CESI avec et sans appoint intégré, on fait le bilan d'un CESI à appoint intégré en décomposant fictivement le ballon en deux, une partie solaire en bas et une partie appoint en haut. La production solaire du CESI est l'énergie fournie par la partie solaire à la partie appoint. Dans le cas d'un CESI à appoint séparé, la production solaire est l'énergie fournie par le ballon solaire au système d'appoint.

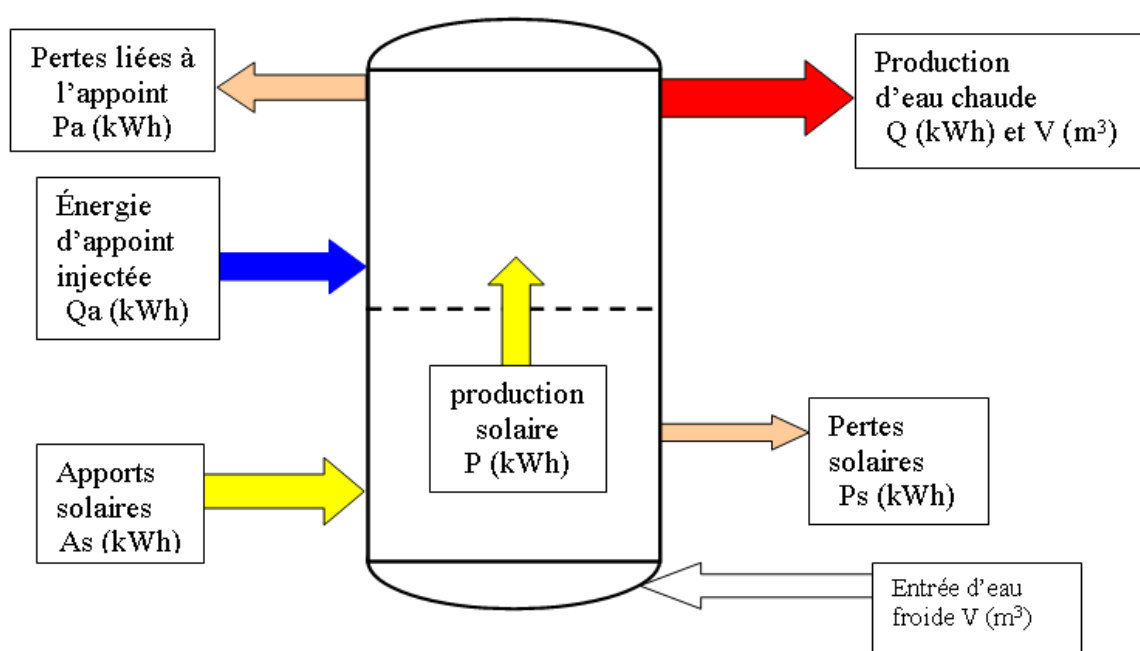


Figure 1 : Schéma de principe d'un CESI.

Selon le schéma de principe ci-dessus, on peut exprimer la production solaire¹ P en kWh par :

$$P = A_s - P_s = Q - Q_a + P_a$$

Dans le cas d'un appoint séparé, on a directement $P = Q$. Dans le cas d'un appoint intégré, il faut estimer les pertes liées à l'appoint intégré. On le fait avec des hypothèses sur la température de consigne de l'appoint (55 °C sauf information spécifique) et sur l'écart entre température ambiante et température d'eau froide.

Un résultat important d'une installation est l'économie d'énergie réalisée, définie comme la différence entre la consommation d'énergie d'une installation de référence et la consommation d'énergie de l'installation solaire (énergie d'appoint + auxiliaires). Dans le cas d'une installation à appoint intégré, la consommation de l'appoint est mesurée. Dans le cas de l'appoint séparé, elle est estimée avec certaines hypothèses.

L'économie d'énergie est exprimée en énergie primaire au sens de la réglementation thermique (1 kWh électrique = 2,58 kWh d'énergie primaire).

On calcule aussi les émissions de CO₂ évitées en utilisant les coefficients suivants (source ADEME) :

- 40 g de CO₂ par kWh électrique non consommé pour l'eau chaude,
- 205 g de CO₂ par kWh de gaz non consommé,
- 270 g de CO₂ par kWh de fioul non consommé.

On a regardé l'influence des différentes hypothèses prises dans les calculs sur la précision des résultats. On considère finalement que l'estimation de la production solaire est assez fiable (de 10 à 20 % près), alors que l'estimation de l'économie d'énergie et de CO₂ l'est un peu moins.

GLOSSAIRE

Taux de couverture solaire : rapport entre l'énergie fournie par la partie solaire d'une installation et la fourniture totale d'énergie de l'installation (NF ISO 9488)

Production solaire : énergie fournie par la partie solaire d'une installation

Productivité solaire : production solaire divisée par la superficie d'entrée des capteurs solaires

¹ voir glossaire

6 BILAN DU PLAN SOLEIL

6.1 BILANS ANNUELS

Région	Nombre moyen d'utilisateurs par CESI	Consommation moyenne d'ECS à 50 °C par jour	Surface moyenne	Prix moyen posé hors prime € TTC	Production solaire annuelle moyenne	Taux de couverture solaire moyen	Économies d'énergie primaire annuelle moyenne	Émissions annuelles de CO ₂ évitées
Languedoc Roussillon 25 CESI	3,5	111 litres 32 litres /pers.	4,3 m ² 1,2 m ² /pers.	4 827 €	900 kWh 210 kWh/m ²	70 %	2 100 kWh	180 kg CO ₂ 40 kg/m ²
Alsace 25 CESI	3,6	118 litres 33 litres /pers.	4,9 m ² 1,4 m ² /pers.	5 063 €	990 kWh 200 kWh/m ²	60 %	1 700 kWh	180 kg CO ₂ 40 kg/m ²
P.A.C.A. 24 CESI	3,3	132 litres 40 litres /pers.	4,6 m ² 1,4 m ² /pers.	4 807 €	1 160 kWh 250 kWh/m ²	68 %	2 800 kWh	180 kg CO ₂ 40 kg/m ²
Rhône-Alpes 17 CESI	3,4	113 litres 34 litres /pers.	4,9 m ² 1,4 m ² /pers.	4 423 €	910 kWh 180 kWh/m ²	59 %	1 500 kWh	220 kg CO ₂ 45 kg/m ²

Tableau 1 : Résultats par région

On constate que le taux de couverture solaire² moyen obtenu (*entre 60 et 70 %*) est conforme à ce que l'on attendait. Cependant la productivité solaire³ autour de 200 kWh/m² (*un peu plus en PACA*) est largement inférieure aux valeurs admises habituellement (400 kWh/m² par exemple).

La consommation d'ECS à 50 °C est d'environ 33 litres à 50 °C par jour et par personne sauf en PACA (40 litres). La production solaire est un peu plus importante en PACA que dans les autres régions. Cela est dû à une plus grosse consommation d'eau chaude.

La consommation d'eau chaude est le paramètre principal qui influe sur la récupération d'énergie solaire. Le climat n'est pas un paramètre essentiel comme on le voit si on distingue les différentes régions (ci-après).

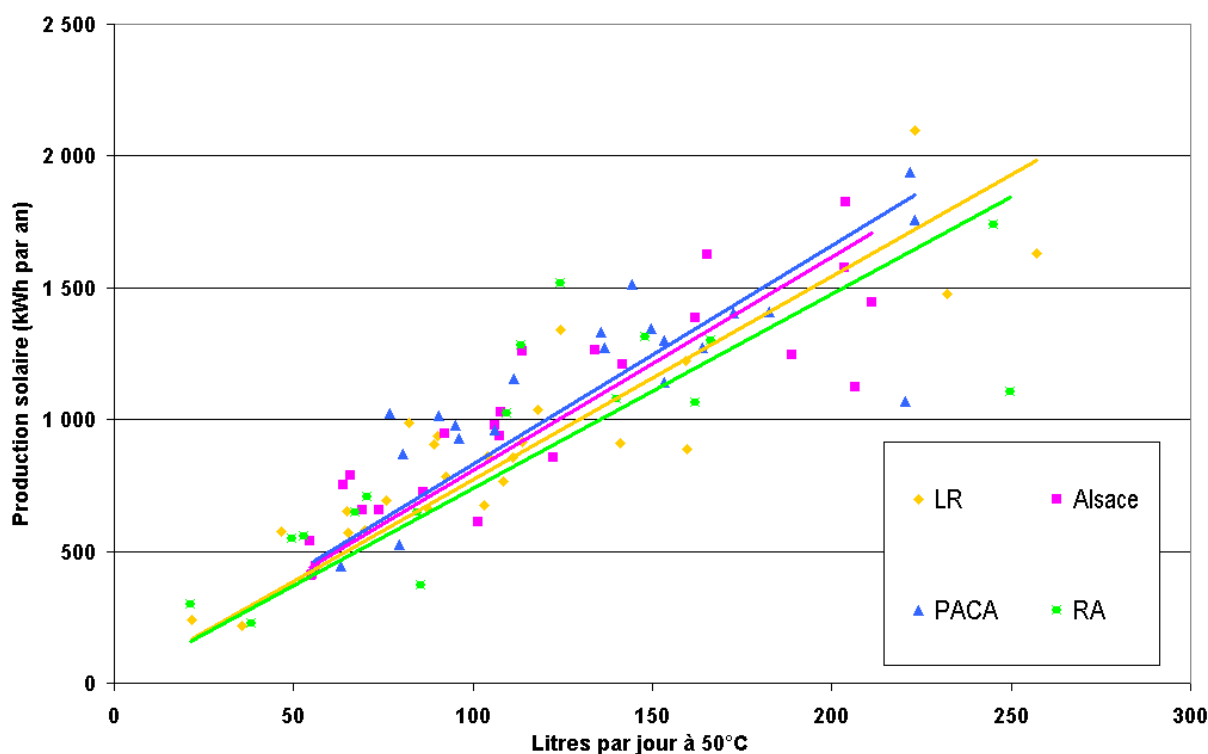


Figure 2 : Production solaire en fonction de la consommation d'ECS et de la région.

² voir glossaire

Les courbes ne font en fait pas apparaître d'influence significative de la région et donc du climat sur la production solaire.

Les deux indicateurs "énergie primaire économisée" et "émissions de CO₂ évitées" dépendent, eux, principalement de l'énergie d'appoint utilisée, par le jeu des différents coefficients de conversion.

Les résultats ne sont pas significativement différents entre installations à appoint séparé et installations à appoint intégré, avec tout de même pour les appoints par combustible, une tendance à l'avantage des appoints séparés. Les installations à appoint intégré présentent l'inconvénient de maintenir en température un volume d'eau chaude largement surdimensionné. On a souvent 150 litres alors qu'une centaine de litres, voire moins, pourraient suffire vu les puissances de chaudières.

Les résultats obtenus ne permettent pas non plus de mettre en évidence des différences notables entre les fabricants.

Sur les installations présentant les plus fortes économies d'énergie, l'appoint est généralement arrêté en été. Sur d'autres pour lesquelles l'appoint n'est jamais arrêté, on observe un taux de couverture de 100 % pendant 2 ou 3 mois d'été. On peut penser qu'elles feraient des économies supplémentaires si l'appoint était coupé. L'ordre de grandeur de ces économies potentielles est cependant faible par rapport à l'économie totale, moins du dixième en général.

6.2 RESULTATS DES SUIVIS DETAILLES

Les **températures de l'eau froide** qui entre effectivement dans le ballon solaire sont relativement élevées par rapport aux données prises habituellement : 25 à 28 °C en été dans les régions méridionales (au lieu de 17 à 19°C), 20 à 25 °C en Alsace et Rhône-Alpes (au lieu de 14 à 16 °C). En hiver la localisation du ballon de stockage intervient. Si le ballon est dans le volume habitable, la température moyenne mensuelle de l'eau froide ne descend pas en dessous de 13 °C. Dans le cas contraire, elle est inférieure de quelques degrés à cette valeur.

Les mesures de température d'eau chaude permettent notamment une estimation de la température fournie par l'appoint lorsqu'il est intégré. Cette température est voisine de 55 °C en moyenne.

Les mesures de **température ambiante** (température du local où est situé le ballon solaire) montrent que celle-ci est supérieure à la température d'eau froide de 2 à 5 degrés en moyenne.

Les mesures du **temps de fonctionnement des pompes** solaires montrent de fortes disparités entre les installations : de 600 à 1200 heures par an pour la plupart, avec une moyenne proche de **1000**. Trois installations sortent de cette fourchette avec des temps de fonctionnement de 250, 2000 et 3500 heures par an. Ces disparités ne semblent pas dues seulement à l'ensoleillement ni à la consommation. Elles viennent en grande partie du réglage de la régulation qui n'est certainement pas optimal partout. On conçoit bien que le temps de fonctionnement de la pompe solaire a une influence importante sur le rendement du chauffe-eau. L'installation pour laquelle la pompe ne tourne que 200 heures par an a une production solaire faible due aussi à une consommation d'eau chaude faible tandis que les deux installations où la pompe tourne plus de 2000 heures par an ont des résultats moyens.

Un aspect important des suivis détaillés était la mesure des **puisages d'eau chaude** pour mieux connaître les comportements des usagers.

Les consommations sont très variables d'un usager à l'autre et aussi, dans une moindre mesure, dans le temps pour un même usager. Pour une consommation moyenne de 100 litres par jour et au-delà, **l'écart type est de l'ordre de 60 litres** pour un même usager. L'écart type diminue pour les consommations faibles mais le coefficient de variation (écart type sur moyenne) augmente. Cette dispersion des consommations dans le temps nuit à la récupération d'énergie solaire (l'énergie solaire perdue les jours où la consommation est faible n'est pas complètement compensée par la bonne récupération les jours de forte consommation).

On a calculé des profils moyens, ce qui permet de visualiser une tendance des consommations, mais filtre les pics et lisse le profil. La figure suivante illustre la différence entre profil moyen et jour réel.

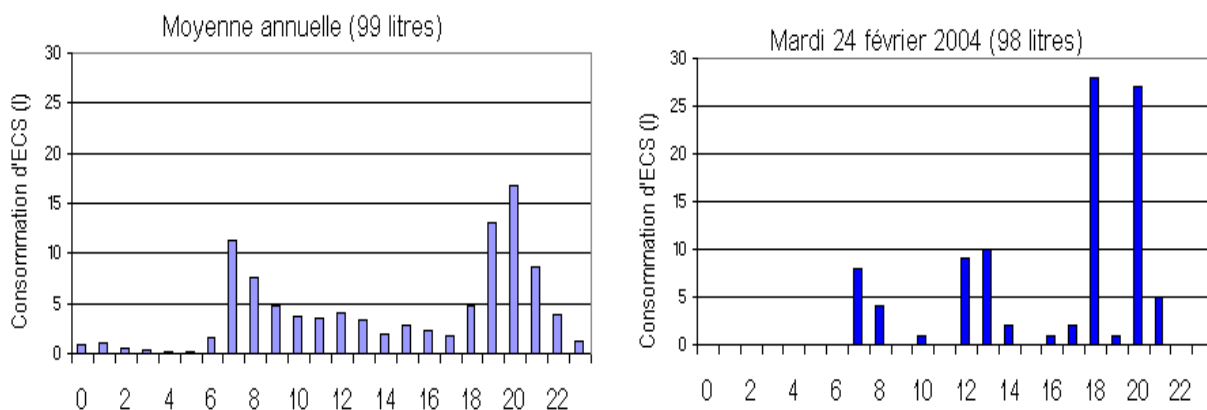


Figure 3 : Exemple de profil moyen annuel (à gauche) et jour réel (à droite)
(en abscisse les heures)

Le profil moyen présente en général un pic le matin, un pic le soir et parfois un troisième pic à midi. Le pic du matin est souvent le plus marqué.

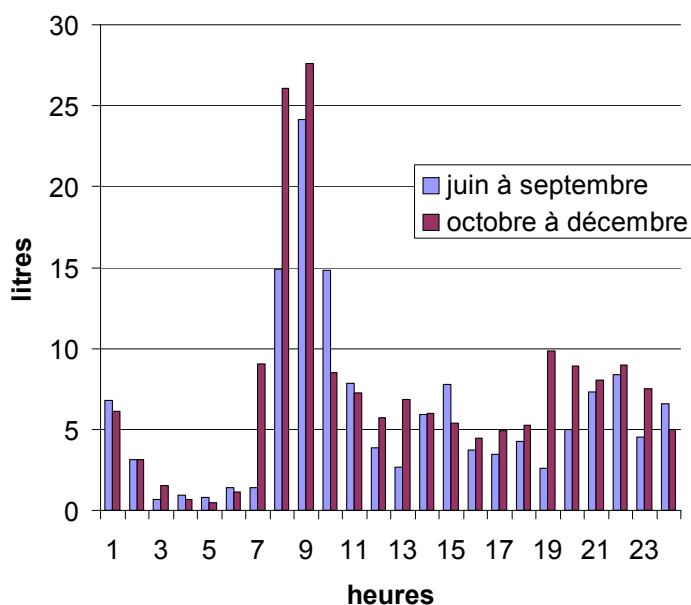


Figure 4 : Exemples de profils moyens typiques

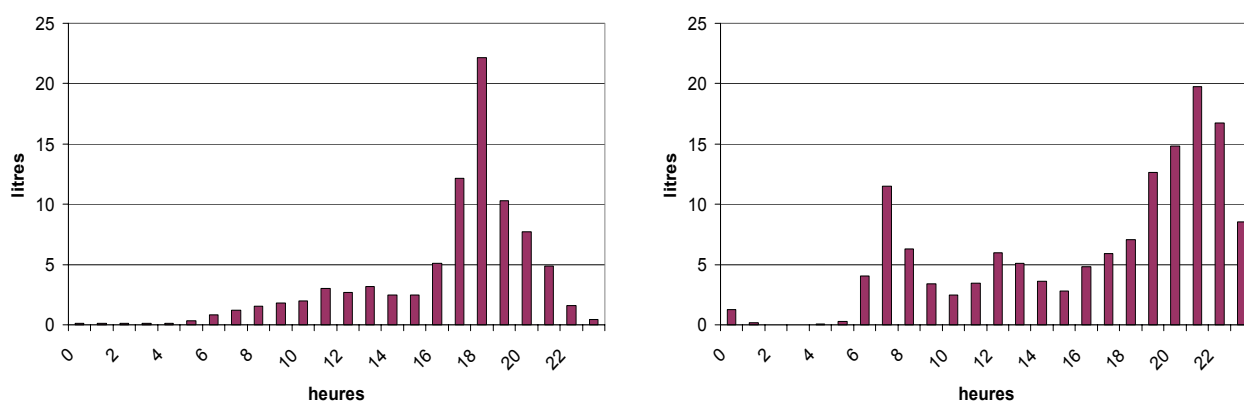


Figure 5 : Exemples de profils moins typiques

L'analyse des profils de puisages confirme ce que l'on savait sur la grande variabilité des consommations d'eau chaude dans le temps et d'un usager à l'autre. C'est une caractéristique que l'on ne prend pas assez en compte lorsqu'on modélise des systèmes individuels.

6.3 BILAN DU PLAN SOLEIL

Pour extrapoler les résultats à une région ou à la France entière (métropolitaine) on considère deux chauffe-eau solaires moyens. Ces deux chauffe-eau ont 4,5 m² de capteurs solaires et produisent 120 litres d'eau chaude à 50 °C par jour. Ils ne se distinguent que par leur énergie d'appoint. Ne connaissant pas exactement la répartition entre les énergies d'appoint, on prend un CESI "moyen" fictif, proche des moyennes régionales, évitant 200 kg de CO₂ par an et économisant 2 MWh d'énergie primaire.

type de CESI	énergie primaire économisée	émissions de CO ₂ évitées
à appoint gaz ou fioul	1,3 MWh	330 kg
à appoint électrique	3 MWh	50 kg
CESI moyen	2 MWh	200 kg

Tableau 2 : résultats des chauffe-eau moyens

On peut ainsi faire le bilan des chauffe-eau solaires individuels (CESI) du plan Soleil.

année d'installation	nombre de CESI installés dans l'année	durée de fonctionnement (années)	milliers de tonnes de CO ₂ évitées par les CESI installés dans l'année	énergie primaire économisée par les CESI installés dans l'année (GWh)
1999	100	6,5	0,1	1
2000	800	5,5	0,9	9
2001	2800	4,5	2,5	25
2002	3700	3,5	2,6	26
2003	5300	2,5	2,7	27
2004	8000	1,5	2,4	24
2005	14000	0,5	1,4	14
total à fin 2005	31700		12,6	126

Tableau 3 : émissions de CO₂ évitées par les CESI du plan Soleil et économies d'énergie primaire

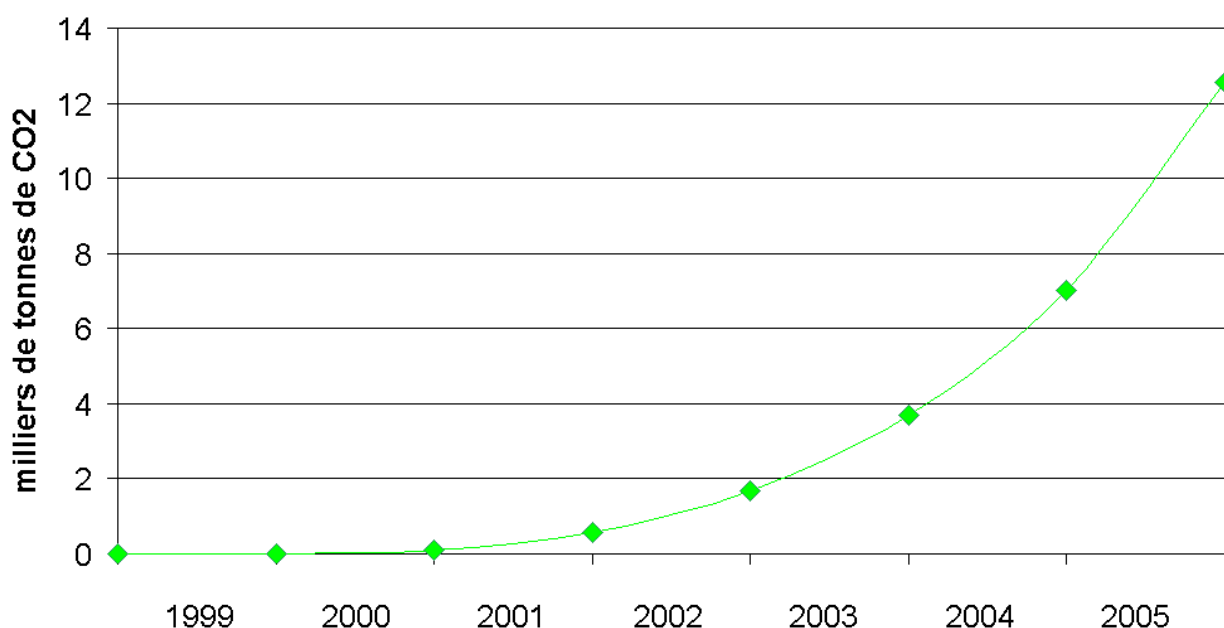


Figure 6 : émissions de CO₂ évitées, cumulées depuis le début du plan Soleil

7 CONCLUSION

L'analyse des mesures effectuées sur 120 chauffe-eau sanitaires individuels (CESI) en situation réelle a permis de mieux connaître leur production énergétique et les économies apportées. On connaît maintenant approximativement l'impact énergétique et environnemental du volet CESI du programme Plan Soleil : à la fin 2005 il a permis une économie d'environ 125 GWh d'énergie primaire et évité le rejet dans l'atmosphère d'environ 13 000 tonnes de gaz carbonique.

Les performances des chauffe-eau solaires (hormis le taux de couverture solaire) ne semblent pas dépendre significativement de la région et donc du climat. Parmi les principaux autres résultats on retiendra les faits marquant suivants :

Les températures d'eau froide sont plus élevées que dans les données utilisées habituellement.

La consommation d'eau chaude moyenne est de 120 litres à 50 °C par jour par installation soit 33 litres par personne en moyenne (un peu plus en PACA).

La productivité est d'environ 200 kWh/m² de capteur solaire. Le surdimensionnement de la surface de capteurs est la cause principale de la productivité faible. Une autre cause possible est le mauvais réglage de la régulation. L'orientation et l'inclinaison des capteurs sont dans l'ensemble satisfaisantes.

Les volumes de stockage (solaires et d'appoint) sont aussi le plus souvent surdimensionnés, sauf les volumes chauffés par des appoints électriques intégrés. Le surdimensionnement des ballons n'a pas seulement pour effet d'augmenter les pertes. Il entraîne aussi des consommations d'appoint supplémentaires (là où un ballon bien dimensionné sera chaud et répondra aux besoins, un ballon surdimensionné sera tiède et l'appoint s'enclenchera). Les volumes de ballons sont souvent identiques quelque soit le type d'appoint, alors que dans le cas d'un appoint par chaudière à gaz ou fioul, ils pourraient être réduits, ce qui améliorerait ainsi les performances.

Les économies réalisées dépendent beaucoup de la gestion de l'appoint, notamment de sa température de consigne. Si cette température est élevée (supérieure à 60 °C) non seulement les pertes augmentent mais aussi la quantité d'eau froide qui entre dans le ballon solaire diminue et donc aussi la production solaire.

A noter enfin que la performance dépend aussi du comportement de l'utilisateur. Les économies sont plus grandes s'il arrête l'appoint pendant tout ou partie de l'été.

Les performances observées sont en fin de compte en deçà de ce que l'on pouvait espérer mais des pistes d'amélioration sont possibles concernant notamment le dimensionnement des capteurs solaires et des ballons (volume solaire et volume d'appoint), la régulation de la boucle solaire, la gestion de l'appoint (température de consigne, gestion annuelle).

Le message qu'il convient de faire passer diffère selon les acteurs de la filière :

Pour les fabricants et les installateurs :

Les installations solaires sont la plupart du temps surdimensionnées. Réduire les dimensions des CESI devrait contribuer à faire baisser le coût de ces systèmes et à faciliter la mise en œuvre et l'intégration architecturale.

Un travail important reste à accomplir sur la régulation de la boucle solaire (réglage des paramètres) et sur l'amélioration des performances des ballons solaires (réduire les pertes).

50 litres d'eau chaude à 50 °C par personne et par jour est un chiffre en moyenne surévalué. Bien que la disparité des besoins en ECS soit forte d'une personne à l'autre, une valeur plus faible doit être retenue. L'étude réalisée, corrélée par d'autres études menées en Europe, montre que la moyenne des besoins en ECS est proche de 33 litres d'eau chaude à 50 °C par personne et par jour. Or aujourd'hui on voit des gammes de ballons solaires (dans le cas d'un CESI à appoint intégré) qui commencent à 300 litres et qui vont jusqu'à 500 ou 600 litres.

Les températures d'eau froide utilisées pour les calculs sont également surestimées. Dans les faits, ces températures sont plus élevées que ce que l'on estime généralement.

Pour les acquéreurs de CESI :

Un chauffe-eau solaire permet de couvrir environ 60 % des besoins en ECS d'une famille. Il permet d'économiser par an de l'ordre de 2 MWh d'énergie primaire et d'éviter de rejeter dans l'atmosphère de l'ordre de 200 kg de CO₂ (les chiffres effectifs dépendent beaucoup du type d'énergie d'appoint). Les économies réalisées dépendent de la consommation d'eau chaude et aussi de la gestion de l'appoint, notamment de sa température de consigne (ne dépassant pas 55°C de préférence).