



Suivi et évaluation énergétique du Plan Soleil

Chauffe-eau solaires individuels

Synthèse du programme de suivi sur sites

10 août 2006

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME, d'EDF et de GDF
par le CSTB - Carol BUSCARLET et Dominique CACCAVELLI

Coordination technique : Département Energies Renouvelables – DERMEE – ADEME Valbonne

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

L'ADEME en bref :

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie est un établissement public sous la tutelle conjointe des ministères de l'Ecologie et du Développement Durable, de l'Industrie et de la Recherche. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable.

<http://www.ademe.fr>

Sommaire

1) INTRODUCTION - OBJECTIFS DE LA CAMPAGNE DE MESURE	4
2) ORGANISATION DE LA CAMPAGNE DE MESURE	4
3) INSTRUMENTATION	4
4) DEROULEMENT DE LA CAMPAGNE	6
5) METHODE D'EXPLOITATION DES MESURES	6
6) BILAN DU PLAN SOLEIL	7
6.1) BILANS ANNUELS.....	7
6.2) RESULTATS DES SUIVIS DETAILLES	8
6.3) BILAN DU PLAN SOLEIL	10
7) CONCLUSION.....	11

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

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). La figure 1 donne montre la localisation des différents compteurs.

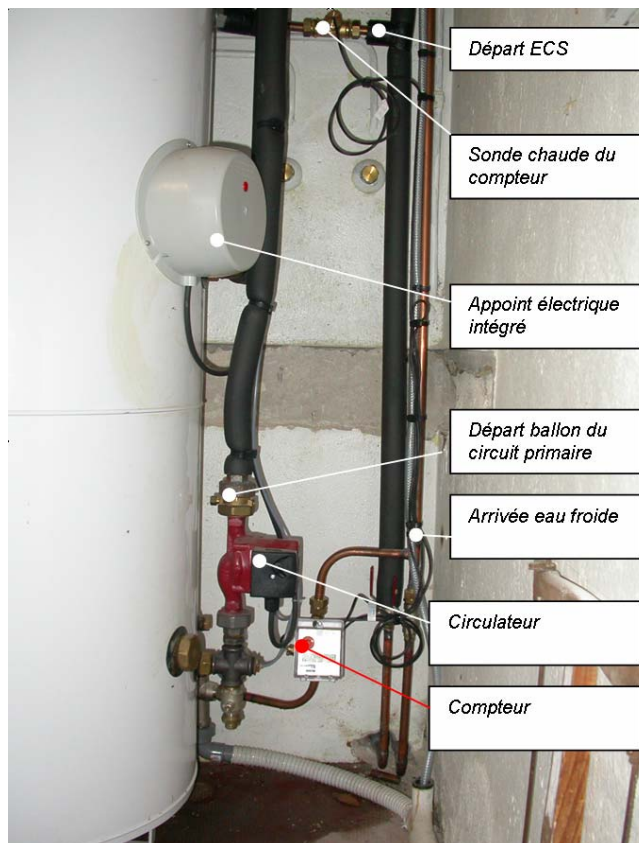


Figure 2 : Position du compteur thermique du ballon solaire et de sa sonde (instrumentation de niveau 1)

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 (voir figure 3).



Figure 3 : Armoire électrique de l'instrumentation de niveau 2

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) Déroulement 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, avec une bonne homogénéité d'une région à l'autre (voir situation dans tableau 1). Le pourcentage observé est dans la norme des campagnes de suivis in situ. Les raisons expliquant ces relevés inexploitable sont les mêmes que celles observées habituellement pour de telles opérations, à savoir :

- collecte d'un nombre insuffisant de relevés mensuels pour diverses raisons (absence ou mauvaise volonté de l'utilisateur, installations instrumentées trop tard),
- 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 (compteur tombé en panne, 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

Tableau 1 : Distribution des relevés exploitables et non exploitables par région

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

5) Méthode 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(voir figure 2).

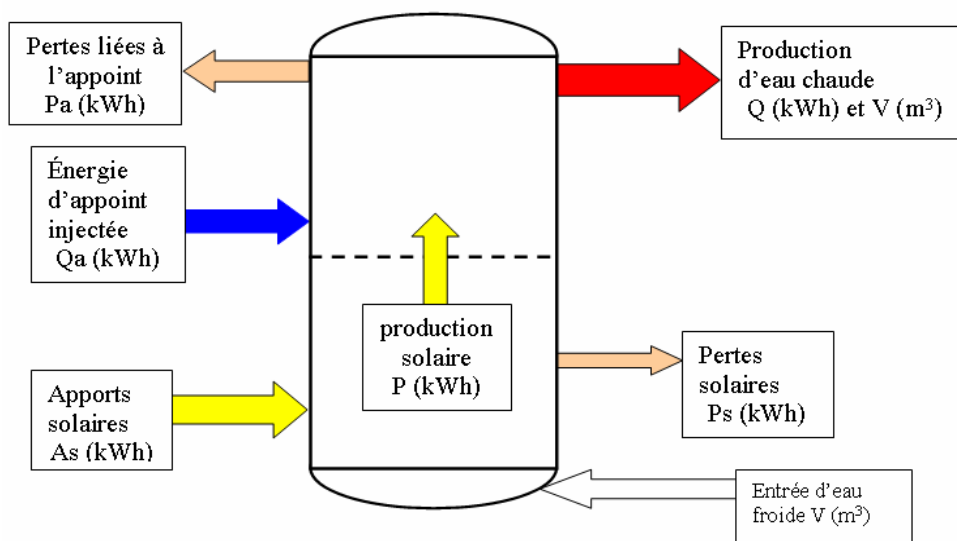


Figure 4 : Schéma de principe d'un CESI

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.

Selon le schéma de principe en figure 2, on peut exprimer la production solaire (voir le glossaire) P en kWh par :

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

5.1) Calcul de l'économie d'énergie réalisée

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. Ceci est réalisé avec des hypothèses sur la température de consigne de l'appoint (55°C, sauf information spécifique) et sur l'écart entre la température ambiante et la température d'eau froide.

Un résultat important pour une installation est l'économie d'énergie réalisée. Elle est 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)

$$E_{eco} = C_{ref} - C_{esi}$$

Dans le cas d'une installation à appoint intégré, la consommation de l'appoint est mesurée. Pour un 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).

5.2) Calcul des émissions de CO₂ évitées

Il est effectué sur la base des 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.

6) Bilan du plan soleil

6.1) Bilans annuels

Région	Nombre d'utilisateurs par CESI	Consommation d'ECS à 50°C par jour	Surface	Prix posé hors prime €TTC	Production solaire annuelle	Taux de couverture solaire	Économies d'énergie primaire annuelle	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 2 : Récapitulatif des résultats par région

Toutes les valeurs indiquées dans le tableau 2 sont des valeurs moyennes sur la période du suivi, excepté pour les économies d'énergie primaire et les émissions de CO₂ évitées (valeurs moyennes annuelles).

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

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.

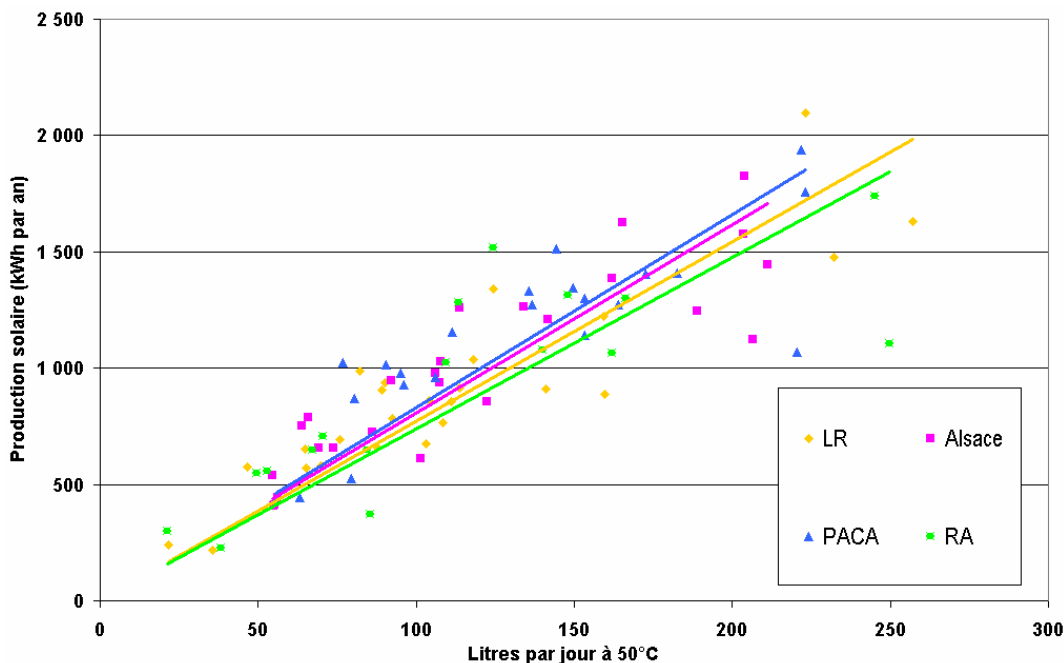


Figure 5 : Production solaire en fonction de la consommation d'ECS et de la région

Le climat n'est pas un paramètre essentiel comme on le voit si on distingue les différentes régions (voir figure 5 ci-dessus). 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 dimensionné. On a souvent 150 litres alors qu'une centaine de litres, voire moins, pourraient suffire vu les puissances de chaudières utilisées actuellement.

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

Pour 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) Résultats des suivis détaillés

6.2.1) Paramètres d'entrée

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.

6.2.2) Paramètres de fonctionnement

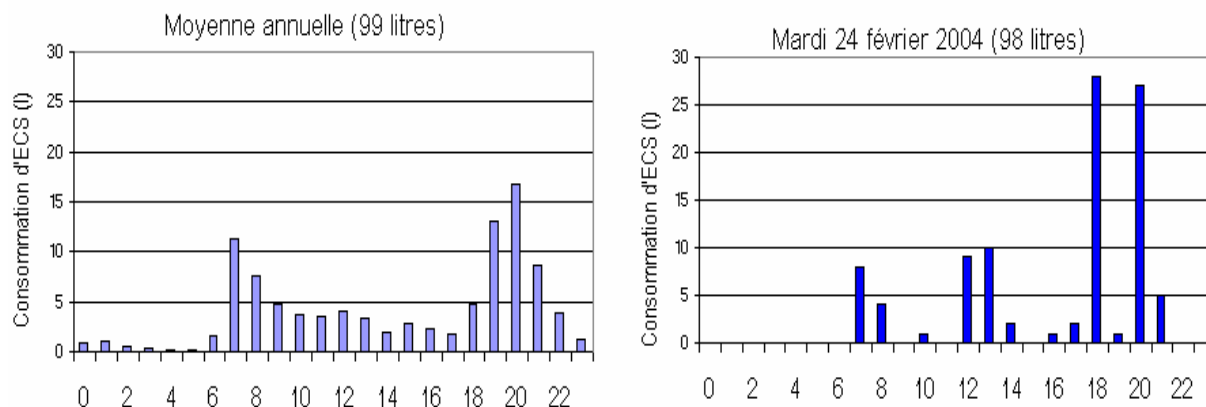
Les mesures du **temps de fonctionnement des pompes** solaires montrent de fortes disparités entre les installations : de 600 à 1 200 heures par an pour la plupart, avec une moyenne proche de **1 000**. Trois installations sortent de cette fourchette avec des temps de fonctionnement de 250, 2 000 et 3 500 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 2 000 heures par an ont des résultats moyens.

6.2.3) Comportement des usagers

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.



Le profil moyen observé 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, comme illustré sur la figure 7 ci-après.

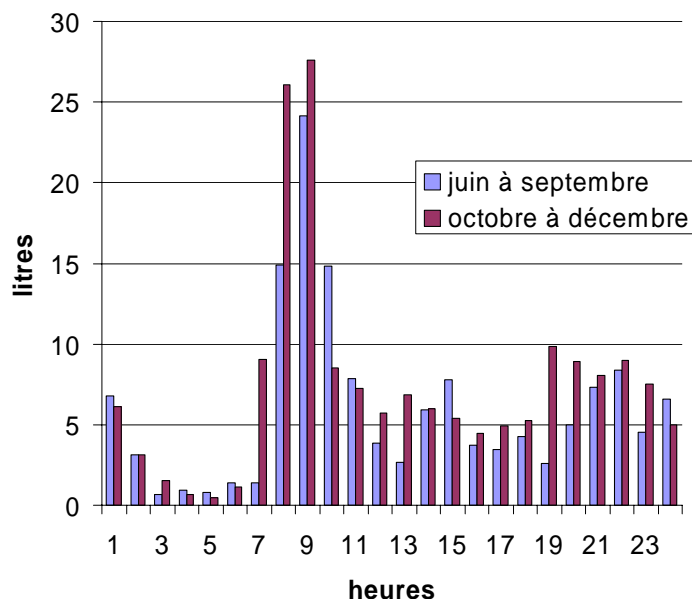


Figure 7 : Exemples de profils moyens typiques

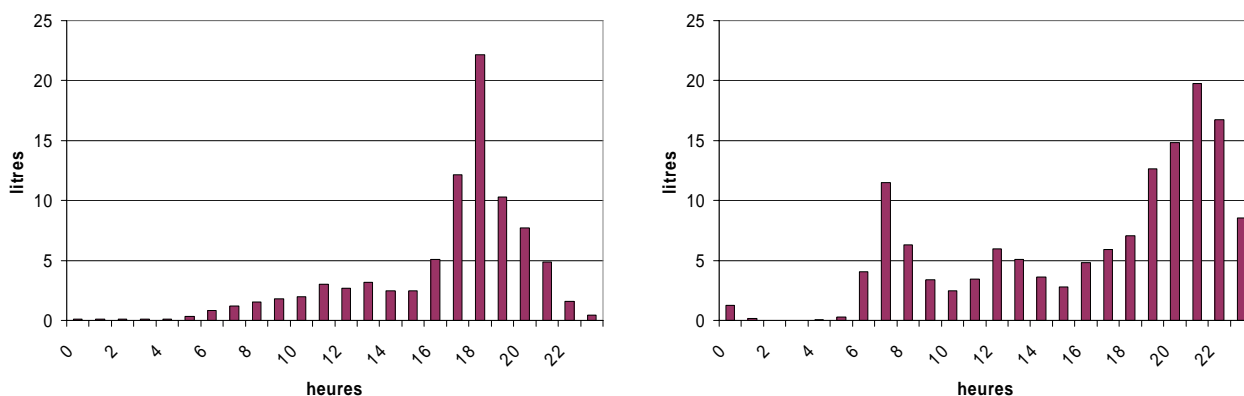


Figure 8 : Exemples de profils moins typiques

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 3 : 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 4 : émissions de CO₂ évitées par les CESI du plan Soleil et économies d'énergie primaire

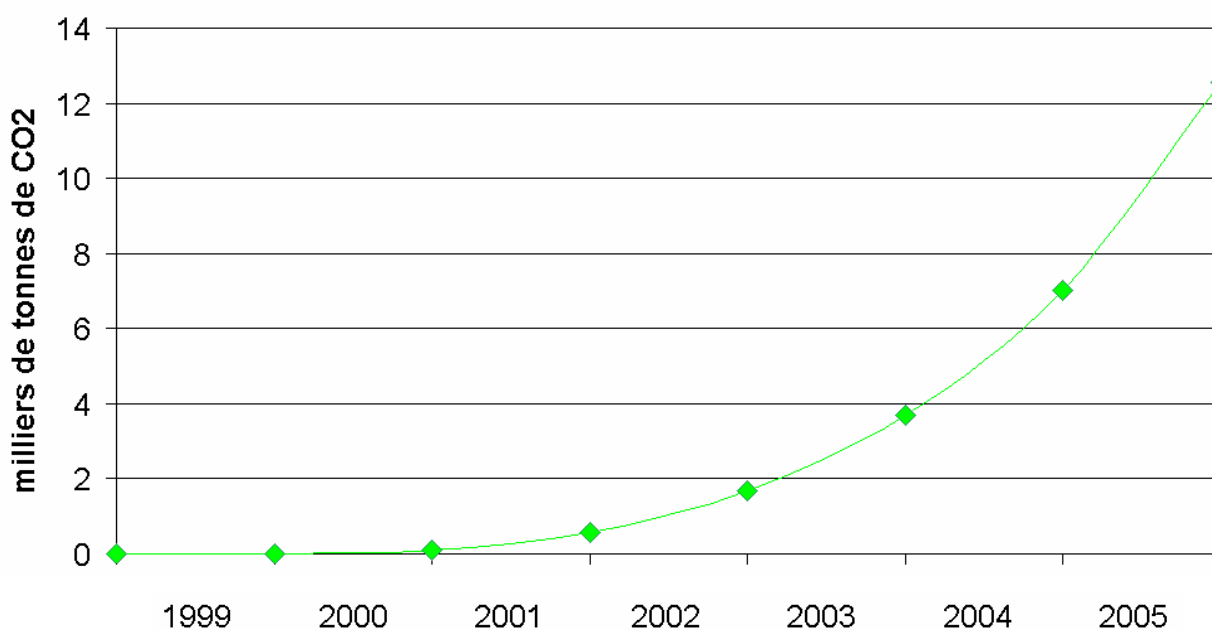


Figure 9 : émissions de CO₂ évitées, cumulées depuis le début du plan Soleil

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 CO₂**.

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 dans les logiciels de dimensionnement des installations.
- 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 également le plus souvent surdimensionnés, sauf les volumes chauffés par des appoints électriques intégrés. Ceci n'a pas seulement pour effet d'augmenter les pertes, mais entraîne également des consommations d'appoint supplémentaires. En

effet, là où un ballon bien dimensionné sera chaud et répondra aux besoins, un ballon de volume trop important 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.

- il est enfin à noter 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.

En résumé, les messages qu'il convient de faire passer selon qu'on s'adresse aux acteurs de la filière ou aux usagers de ces systèmes sont les suivants.

7.1) Pour les fabricants et les installateurs

Les installations solaires sont la plupart du temps surdimensionnées (surface capteurs et volume ballon stockage). 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.

7.2) Pour les acquéreurs de CESI

Un chauffe-eau solaire permet de couvrir environ 60 % des besoins annuels 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).