

3.2 L'étude détaillée

3.2.1 Le dimensionnement des équipements solaires

3.2.1.1 Principes du dimensionnement

En France métropolitaine, il n'est pas réaliste de vouloir couvrir 100 % des besoins d'eau chaude sanitaire en utilisant seulement l'énergie solaire.

Une installation solaire sera donc toujours couplée avec un système appoint utilisant une autre source d'énergie : gaz, électricité...

Le dimensionnement de l'appoint vise à assurer :

- le service en eau chaude en toutes circonstances. C'est un problème classique qui nécessite surtout une bonne évaluation des besoins,
- la meilleure répartition possible entre solaire et appoint.

C'est un problème complexe qui nécessite l'utilisation d'outils de calcul spécifiques afin de produire un maximum d'énergie solaire à un coût compétitif.

En effet, le coût du kWh produit dépend essentiellement de deux paramètres :

- le coût de l'installation par m^2 de capteur,
- la productivité de l'installation (production par m^2 de capteur et par an).

Le coût de l'installation peut être approché par une formule relativement simple. En particulier, il dépend de façon quasi-linéaire de la surface de capteurs.

La productivité des capteurs n'est par contre pas définissable de façon simple. Elle décroît quand la surface de capteurs croît : le dernier mètre carré de capteurs produit moins d'énergie que le premier. En conséquence, toute augmentation de la surface de capteurs au delà de la taille optimale de l'installation entraîne une augmentation de la production solaire mais aussi une augmentation du coût du kWh produit.

Le mauvais dimensionnement d'un des autres composants du système (stock, échangeur, circuits, régulation) peut pénaliser sensiblement cette productivité.

La méthode de dimensionnement présentée ici s'appuie sur une méthode de calcul des performances d'un système de production d'eau chaude sanitaire solaire simple mais fiable afin de bien prendre en compte les phénomènes exposés ci-dessus.

Méthodologie pour le dimensionnement d'une installation

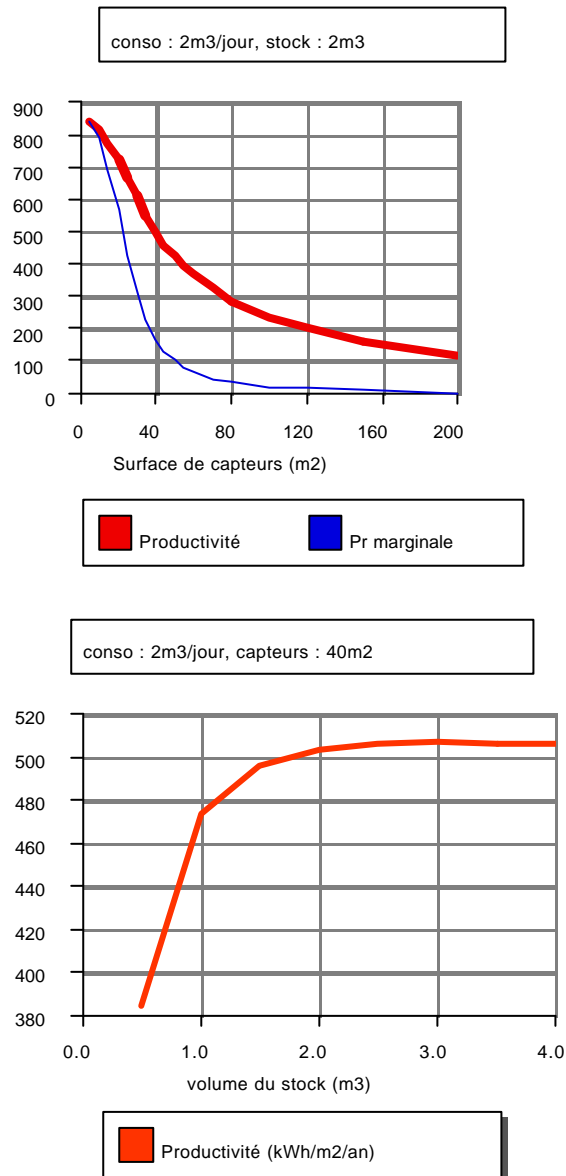
- Recueillir les données nécessaires.
- Définir les principes de fonctionnement de l'installation
- Pré-dimensionner les composants principaux.
- Optimiser le dimensionnement des équipements solaires à partir des bilans de différentes variantes
- Finaliser le dimensionnement de l'ensemble des composants

3.2.1.2 Exemple

Cet exemple est destiné à illustrer l'influence du dimensionnement des capteurs et des autres composants, en examinant les résultats obtenus pour différents dimensionnements d'un système solaire situé à Perpignan et destiné à répondre à des besoins ECS définis par une consommation journalière constante : 2 000 litres/jour d'eau chaude à 45°. Tous les calculs sont effectués avec la méthode SOLO.

On définit d'abord une installation de référence qui fournit 80% des besoins, 20% étant couverts par l'appoint. Cette installation comporte 40 m² de capteurs et un stock de 2000 litres. Elle produit 20,2 MWh/an pour des besoins de 25 MWh/an. La productivité moyenne des capteurs est relativement faible : 504 kWh/m² en raison du taux de couverture solaire élevé.

On fait ensuite varier autour de ces valeurs de référence d'une part la surface de capteurs, d'autre part le volume du stock. Ceci nous permet de construire les deux graphes ci-dessous.



Variation de la productivité en fonction du dimensionnement des composants principaux

La productivité des capteurs diminue avec la surface et la productivité marginale (celle du dernier capteur) est rapidement très faible :

- le 1^{er} m² de capteur fournit 850 kWh/an environ ; le 20^{ème} m² fournit 500 kWh/an,
- le 40^{ème} m² de capteur fournit 150 kWh/an environ ; le 80^{ème} produit moins de 50 kWh,
- au-delà de 100 m², les capteurs ne produisent quasiment rien.

Les variations du stock ont peu d'influence au-delà de 2000 litres. Par contre, la présence d'un stock trop petit est très pénalisante :

- un stock de 2000 litres donne une productivité de 500kWh/an environ,
- un stock de 1000 litres donne une productivité de 475 kWh/an (-5%),
- un stock de 500 litres donne une productivité de 400 kWh/an (-25%).

Les résultats numériques seraient évidemment différents dans d'autres situations mais on retrouverait les mêmes tendances.

3.2.2 Évaluation des performances d'une installation solaire

3.2.2.1 Évaluation de la production énergétique instantanée d'un capteur solaire

Équation fondamentale

La production énergétique instantanée d'un capteur solaire peut être définie par une équation caractéristique simple dans laquelle le capteur est caractérisé par sa surface et par deux coefficients caractéristiques. Cette équation admet différentes formes suivant la température de fluide qui sert de référence.

En France, on utilise la température moyenne du fluide dans le capteur. Au niveau de la normalisation internationale, on utilise plutôt la température d'entrée du fluide.

On a ainsi les deux écritures :

$$Pu = S (B I - K (T_{fm} - T_e)) \quad \text{ou :} \quad Pu = S(F\tau\alpha I - FrUI(T_{fe} - T_e))$$

Avec :

Pu : puissance utile (W/m^2)

I : flux de rayonnement disponible sur le plan des capteurs (W/m^2)

T_e : température ambiante ($^{\circ}C$)

T_{fe} : température d'entrée du fluide dans les capteurs ($^{\circ}C$)

T_{fm} : température moyenne du fluide dans les capteurs ($^{\circ}C$)

S : surface des capteurs (m^2)

$B, F\tau\alpha$: coefficient caractéristique des gains du capteur (-)

$K, FrUI$: coefficient caractéristique des pertes du capteur ($W/m^2/^{\circ}C$)

Définition des coefficients caractéristiques

En toute rigueur, les coefficients caractéristiques sont des variables dépendant des conditions régnant à un moment donné. En pratique, un capteur donné peut être caractérisé par un couple unique (B, K) ou ($F\tau\alpha, FrUI$) déterminé par mesure dans des conditions normalisées. On peut évaluer les performances d'une installation solaire utilisant ce type de capteur à partir de ces valeurs normalisées qui figurent, par exemple, dans les avis techniques des capteurs commercialisés en France.

Le coefficient B est généralement compris entre 0,7 et 0,8 pour les capteur plans, entre 0,5 et 0,8 pour les capteurs sous vide (à incidence normale).

Le coefficient K est généralement compris entre 4 et 10 $W/m^2/^{\circ}C$ pour les capteur plans, entre 1,5 et 3 $W/m^2/^{\circ}C$ pour les capteurs sous vide.

Les valeurs de $F\tau\alpha$ et $FrUI$ sont légèrement plus faibles que celles de B et K . On peut calculer assez facilement une valeur approchée des uns à partir des autres. Nous utilisons ici B et K , seuls normalisés actuellement en France, dans l'attente de l'application de normes européennes.

Surface de capteur

Il existe plusieurs définitions possibles de la surface d'un capteur. Les termes les plus couramment utilisés sont ceux de "surface hors tout" et de "surface utile" :

- la surface hors tout (Sht) est à la surface supérieure du coffre du capteur,
- la surface utile, plus petite, est la surface d'entrée (Se) du rayonnement (vitrage).

La surface hors tout permet de mieux prendre en considération les problèmes d'encombrement tandis que la surface utile est plus significative en terme de rendement thermique.

L'écart entre ces valeurs est faible pour les capteurs plans (5% à 10%), plus important pour les capteurs sous vide (10% à 20%).

Les caractéristiques données par les constructeurs font référence à l'une ou l'autre de ces surfaces, ou aux deux. Les avis techniques du CSTB donnent la surface d'entrée et la surface hors tout. En pratique, on peut utiliser l'une ou l'autre pourvu que toutes les caractéristiques fassent référence à la même définition de la surface. Dans le cas contraire, on risque de commettre des erreurs significatives sur les bilans énergétiques et économiques. En particulier :

- dans le calcul des performances, on utilisera les paramètres caractéristiques des capteurs (coefficients B et K) définis pour la surface de référence choisie,¹
- dans les calculs économiques, on définira les coûts unitaires (par m²) par rapport à cette même surface de référence choisie.

Par exemple, considérons un capteur X sous un ensoleillement de 800 W et une température extérieure de 20°C. On suppose que la température moyenne du fluide dans le capteur est de 60°C. On peut calculer la puissance utile dans 4 cas, suivant la référence (hors tout ou utile) utilisée pour S d'une part ; B et K d'autre part :

	S/B&K	S	B	K	Formule	Pu
Cas 1	utile/utile	2.0	0.77	4.49	$2.0(0.77*800-4.49*40) = 1232 - 359 =$	873 W
Cas 2	hors-tout/hors-tout	2.1	0.74	4.28	$2.1(0.74*800-4.28*40) = 1243 - 359 =$	884 W
Cas 3	utile/hors-tout	2.0	0.74	4.28	$2.0(0.74*800-4.28*40) = 1184 - 342 =$	842 W
Cas 4	hors-tout/utile	2.1	0.77	4.49	$2.1(0.77*800-4.49*40) = 1294 - 377 =$	917 W

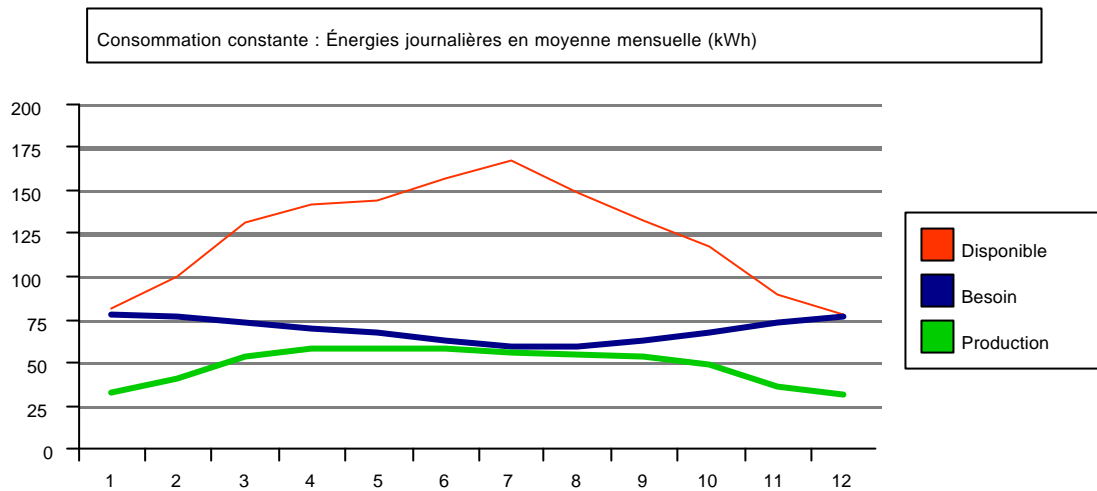
Influence d'une mauvaise définition des caractéristiques d'un capteur.

Les deux premiers modes de calcul, tous deux corrects, donnent la même valeur : 880 W à ±1% près, normal compte tenu de la précision des données B, K et S. Les deux derniers modes, incorrects, donnent des valeurs, inférieures ou supérieures de 4% à ces 880 W. On sous-estime ou surestime donc, suivant le cas, la production de 4%, ce qui n'est plus tout à fait négligeable.

¹ Quelle que soit la surface de référence choisie (Sht ou Se) les grandeurs Sht.B et Sh.K sont des invariants du capteur. Ceci conduit à associer les grandeurs B et K à la surface hors tout et les grandeurs B' et K' à la surface d'entrée, avec la relation Sht.B = Se.B' et Sht.K = Se.K'

3.2.2.2 Interaction entre consommation, production et stock

Le graphique suivante dets un exemple qui illustre un phénomène fondamental : la production solaire est plafonnée par les besoins.



Ces deux paramètres varient dans le temps de façon totalement indépendante. En raison de l'inertie thermique, ces discordances sont sans importance à l'échelle de quelques minutes mais ne le sont plus à l'échelle d'une heure, a fortiori d'un jour ou d'un mois.

La production horaire est ainsi, par exemple, plafonnée par les besoins horaires.

L'utilisation d'un stock approprié permet de gagner un ordre de grandeur en lissant les variations à l'échelle d'une journée. La discordance entre profils journaliers de rayonnement solaire et de consommation d'eau chaude n'a plus qu'un impact limité mais la production journalière reste plafonnée par les besoins journaliers.

Par contre, il est, actuellement, à peu près impossible de compenser les discordances sur des échelles de temps longues, en particulier celles qui sont liées aux fortes variations saisonnières du rayonnement solaire.

3.2.2.3 Interaction entre définition du système, état du système et production.

La présence d'un stock évite les surplus temporaires de production mais n'élimine pas toute influence des variations des apports solaires et de la consommation.

En effet, dans l'équation fondamentale vue plus haut, les termes S.K. ($T_{fm}-T_e$) ou Fr_{UI} ($T_{fe}-T_e$) caractérisent les pertes thermiques du capteur. Ils sont proportionnels à la différence de température entre le fluide interne et l'air ambiant.

Les performances d'un capteur dépendent donc fortement de la température du fluide dans le capteur.

Considérons par exemple un capteur de 1 m^2 de caractéristiques ($B = 0,8$; $K = 5 \text{ W/m}^2/\text{°C}$) soumis à un flux de rayonnement élevé I de 1000 W/m^2 et à une température extérieure de 25°C . La puissance instantanée fournie par ce capteur sera, en fonction de la valeur de T_{fm} :

- $T_{fm} = 25\text{°C}$ ($T_{fe} = 17\text{°C}$) $Pu_1 = 0,8 \times 1000 - 5 \times (25-25) = 800 \text{ W}$
- $T_{fm} = 45\text{°C}$ ($T_{fe} = 38\text{°C}$) $Pu_2 = 0,8 \times 1000 - 5 \times (45-25) = 700 \text{ W}$
- $T_{fm} = 65\text{°C}$ ($T_{fe} = 49\text{°C}$) $Pu_3 = 0,8 \times 1000 - 5 \times (65-25) = 600 \text{ W}$ (soit $Pu_1 - 25\%$)

Or, en présence d'un stock, la température d'entrée T_{fe} est une inconnue du système. Si on a un stock à température uniforme TS et pas d'échangeur, on a : $T_{fe} = TS - \epsilon$. (ϵ représente le refroidissement du fluide dans le circuit entre stock et capteur).

Même dans ce cas simple, T_{fe} varie en permanence car TS varie en fonction des apports solaire et du puisage d'eau chaude. La stratification éventuelle du stock, la présence d'un échangeur, la régulation des pompes de circulation ont aussi une influence sur T_{fe} donc sur la puissance utile Pu à l'instant t qui dépend donc :

- des caractéristiques des capteurs,
- des autres paramètres du système : schéma, échangeur, stock, régulation,
- du profil des apports solaires,
- du profil de puisage.

3.2.2.4 Conséquence sur la définition et l'évaluation d'un système.

La production utile d'une installation solaire de production d'eau chaude sanitaire dépend de façon complexe de différents paramètres : données météorologiques, besoins, schéma, dimensionnement.

On ne peut donc pas définir la production journalière, mensuelle ou annuelle par une équation simple.

Le dimensionnement vise en général à obtenir un compromis acceptable entre deux objectifs contradictoires :

- un taux de couverture solaire C_s élevé,
- et un rendement élevé,

car en augmentant C_s , on favorise les sources principales de pertes thermiques :

- les surplus temporaires de production,
- les pics de température dans les capteurs.

Un bon dimensionnement repose sur trois points :

- l'utilisation d'un outil adéquat de calcul des performances,
- une définition claire des besoins, critères et contraintes du dimensionnement,
- une démarche méthodique et ordonnée de dimensionnement des composants.

Quels besoins ?

- Niveaux de température
- Quantité journalière
- Profil annuel. Régularité du profil

Quel climat ?

Quelles contraintes ?

Quels schémas ?

- Quels principes ?
- Avec ou sans échangeurs
- Nature de la régulation
- Principe d'appoint

Quel dimensionnement ?

- Nature de l'appoint
- Taux de couverture souhaité
- Budget
- Méthode de calcul (SOLO, TRNSYS...)
- Fichier météo et données climatiques
- Variantes de dimensionnement
- Coût estimé

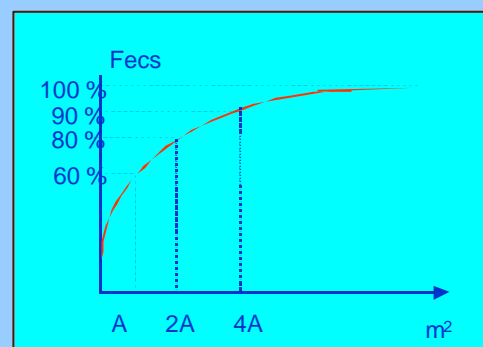
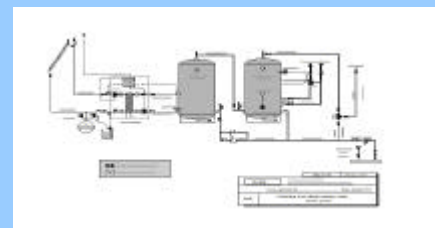
Quels matériels ?

- Type de climat (ensoleillement, humidité, vent, gel...)
- Qualité de l'eau

Cahier des charges

Suivi et contrôle

Garantie de Résultats Solaires



3.2.3 Outils de calcul des performances d'un système solaire ECS

3.2.3.1 Les familles d'outils

Tous les outils de calcul des performances des installations solaires ECS utilisent l'équation fondamentale définissant la production instantanée d'un capteur. Ils prennent en compte les autres composants du système (modèle spatial) et l'évolution du système au cours du temps (modèle temporel) pour en déduire les performances du système.

On peut ainsi distinguer deux familles d'outils :

- Les outils détaillés calculent explicitement T_{fm} , et plus généralement l'état détaillé du système heure par heure et jour par jour et en déduisent les bilans énergétiques sur une période quelconque. (exemple : TRNSYS). Les outils détaillés permettent une compréhension fine du comportement du système. Ils reposent sur des modèles physiques précis : on connaît la température en sortie de capteur le 13 juillet à 13h30. Le pas de temps du calcul varie de 1 minute à 1 heure. Une année de simulation implique donc des milliers de calculs.
- Les outils simplifiés utilisent des équations semi-empiriques qui prennent en compte les différentes données pour définir la production énergétique journalière (exemple : SOLO). Les outils simplifiés fournissent seulement des bilans énergétiques journaliers, en moyenne mensuelle. Ils reposent sur des modèles physiques simplifiés, recalés et validés à partir de modèles détaillés et d'expériences. Une année de simulation implique seulement les 12 calculs des 12 journées moyennes mensuelles.

Les outils détaillés ont longtemps été pénalisés par des temps de calcul longs. Ce n'est plus le cas aujourd'hui puisqu'une année de simulation ne nécessite que quelques secondes de calcul sur un micro-ordinateur récent.

On aurait pu penser que les outils détaillés tendraient à éliminer les outils simplifiés, a priori moins précis. Ce n'est pas le cas car le gain de précision sur les bilans n'est pas réellement significatif en matière de dimensionnement et il se paye par une certaine lourdeur d'utilisation, en raison de la quantité et de la précision des données nécessaires.

Ainsi, par exemple, un outil de calcul détaillé nécessite des données météorologiques très détaillées, au minimum, une année-type heure par heure au moins, soit 8760 valeurs par paramètre. Avec un outil simplifié, on utilise des données journalières en moyenne mensuelle, soit 12 valeurs par paramètre. Les données détaillées sont rares et il est difficile de juger leur représentativité. Comment mesurer le gain de précision s'il est impossible de juger de la précision ou de la représentativité des données ?

L'utilisation des résultats détaillés (états successifs du système) présente un grand intérêt pour la mise au point de schémas spécifiques ou l'analyse du comportement d'une régulation mais c'est une tâche lourde et disproportionnée, lorsqu'il s'agit de dimensionner une installation solaire classique reposant sur des règles validées.

Les outils simplifiés sont donc mieux adaptés au dimensionnement. Les outils détaillés, bien qu'utilisables, n'apportent rien de plus, hors installations spécifiques, tout en étant complexes et coûteux. Ils ne sont donc pas étudiés ici.

3.2.3.2 Un outil simplifié : SOLO

Les outils simplifiés les plus connus en France sont F-chart et SOLO. Il s'agit de méthodes anciennes, reconnues, disponibles sous forme d'outils informatiques relativement conviviaux. Ces outils fournissent les bilans énergétiques journaliers en moyenne mensuelle d'une installation solaire. L'origine américaine de F-chart complique un peu son utilisation en France car les outils informatiques associés n'intègrent pas les données météorologiques de la France et utilisent ($F_{r\tau\alpha}$, F_{rUI}) plutôt que (B,K). De plus, les performances semblent systématiquement pessimistes en hiver en France hors des zones les plus ensoleillées.

SOLO est une méthode de calcul développée par le CSTB. Différents outils informatiques reposent sur cette méthode (logiciels pour micro-ordinateur, serveur minitel, site internet). Ces outils utilisent la même méthodologie de calcul à quelques différences minimales près. Ils intègrent tous une base de données météorologiques importante (plus de 60 stations en France métropolitaine) et une base de composants (en particulier les caractéristiques des capteurs solaires courants en France).

Dans les différents outils basés sur SOLO, la saisie des données d'une installation ne prend que quelques minutes. Le calcul proprement dit est quasi-instantané. Une demi-heure suffit pour tester plusieurs variantes de dimensionnement.

SOLO calcule la production solaire à l'aide d'équations semi-empiriques qui ont été établies en traitant des cas-types avec une méthode détaillée.

La démarche adoptée est la suivante. Les données nécessaires sont précisées ci-dessous.

a) On calcule les besoins énergétiques journaliers en moyenne mensuelle :

- consommation journalière et température d'eau froide en moyenne mensuelle,
- température de consigne de l'eau chaude supposée constante sur l'année.

b) On calcule le rayonnement global journalier en moyenne mensuelle sur le plan des capteurs par des méthodes classiques utilisant d'une part les données astronomiques et la géométrie, d'autre part des corrélations statistiques sur le rayonnement solaire :

- rayonnement global horizontal journalier en moyenne mensuelle,
- inclinaison et orientation des capteurs.

c) On calcule le taux de couverture solaire en moyenne mensuelle par une équation empirique complexe utilisant les résultats des points a) et b) :

- type de schéma (à choisir parmi 5 schémas-types, en général),
- capteurs : surface totale S, paramètres B et K,
- stock : volume V, constante de refroidissement CR, intérieur ou extérieur,
- circuit primaire (coefficient de pertes K_t) et échangeur (coefficient d'échange $K_{éch}$),
- Note : plusieurs outils pré-définissent les valeurs de K_t et $K_{éch}$.

d) On en déduit les bilans énergétiques journaliers, mensuels et annuel.

SOLO permet d'analyser rapidement les conséquences d'un choix de conception ou de dimensionnement ou d'une évolution des besoins. La saisonnalité est prise en compte. Enfin, les résultats obtenus ont été validés par l'expérience, en particulier par son utilisation depuis plus de 10 ans en Garantie de Résultats Solaires.

SOLO2000

Fichier Edition Calculer Outils ?

C:\Program Files\Solo2000\Projet0001.s2k

METEO

Station
 Pays: **France**
 Départ: **01-Ain**
 Station: **Ambérieu**

Site
 Altitude [m]: **300**
 Distance mer [km]: **>= 10**
 Millions d'hab.: **< 0.5**

BESOINS

Consommation/purs [l/j]
 moy: 1000

Temp. eau chaude [°C]
 moy: 50

SYSTEME CAPTEUR BALLON

Capteurs
 Catégorie: **Capteurs vitrés**
 Type: **Buderus Logasol SK5**
 Kc [W/(m².K)]: **489.00** Bc: **79.00** Ac [m²]: **2.22**
 Inclinaison [°]: **46** Nombre: **1**
 Orientation [°]: **0** Surf.totale [m²]: **2.22**

Boucle de captage
 Déperdition thermique [W/(m².K)]: **4917523**
 Calorifugeage: **Avec**
 Efficacité: **7.00**

Ballon
 Type: **1001_Vertical**
 Lieu: **Extérieur**
 Vn [l]: **100** Vs [l]: **85**
 Ds [W/K]: **85.00**

RESULTATS

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annuel
Couverture [%]	17	20	24	26	28	30	31	30	28	23	19	16	24
Besoins [kWh]	1579	1400	1474	1375	1352	1249	1255	1259	1267	1406	1444	1561	16620
Productivité [kWh]	263	279	348	362	385	374	385	378	349	326	270	248	9656264
Productivité /m²	118	126	157	163	173	169	173	170	157	147	122	112	1786

État 6/15/01 9:05 AM

Le calcul des performances prévisionnelles : méthode SOLO (Source CSTB)

3.2.4 Méthodologie de définition et dimensionnement

La méthodologie de définition et dimensionnement présentée ici est centrée sur l'évaluation des performances par la méthode SOLO et se décompose en 5 étapes :

Etape 1 - Recueil des données nécessaires

Etape 2 - Définition des principes de l'installation

Etape 3 - Prédimensionnement des composants principaux

Etape 4 - Optimisation du dimensionnement en calculant les bilans de variantes de l'installation initiale

Etape 5 - Finalisation de la définition et du dimensionnement de l'ensemble des composants

3.2.4.1 Recueil des données nécessaires

L'incertitude sur les besoins est la principale source potentielle d'une erreur grave de dimensionnement, celle sur les autres données a une influence plus limitée.

Données nécessaires concernant les besoins en eau chaude (SOLO)

Ce sont :

- la température de consigne de l'eau chaude supposée constante sur l'année,
- la consommation journalière en moyenne mensuelle.

Une bonne connaissance des besoins en eau chaude est indispensable. En particulier, toute surévaluation des besoins risque de conduire à un surdimensionnement de l'installation gravement préjudiciable à sa productivité, et donc à sa rentabilité, puisque, comme on l'a vu, la productivité des capteurs diminue lorsque le taux de couverture solaire augmente.

En pratique :

- dans le cas d'une installation de production d'eau chaude pré-existante à la mise en place du système solaire, on mesure la consommation réelle sur une période significative,
- dans le cas d'une installation neuve, on s'appuie sur les résultats connus pour des utilisations du même type et on privilégie les hypothèses basses.

Critères et contraintes

Les critères de décision doivent être définis avec le maître d'ouvrage. Il cherche en général à maximiser la rentabilité économique de l'investissement, mais il pourra compléter ce critère par différentes contraintes qui devront être prises en compte :

- assurer un taux de couverture solaire minimal donné annuel,
- assurer un taux de couverture solaire minimal à certaines périodes,
- ne pas dépasser un investissement maximal,

D'autres contraintes peuvent résulter de considérations pratiques sur le site :

- la surface maximale disponible pour l'implantation des capteurs,
- le choix d'orientation et d'inclinaison limités pour les capteurs, ombrages
- emplacement disponible pour le(s) ballon(s) de stockage.

Finalement, on devra généralement résoudre un problème de maximisation (ou minimisation) sous contraintes d'une fonction faisant intervenir les bilans énergétique et économique.

Données météorologiques nécessaires (SOLO)

Les données météorologiques nécessaires à SOLO sont :

- la température moyenne mensuelle,
- le rayonnement global journalier dans le plan horizontal en moyenne mensuelle,
- la température d'eau froide en moyenne mensuelle.

On prend les données du site si elles sont connues (ce qui est rarement le cas, en particulier pour le rayonnement) ou celles d'une station météorologique proche contenue dans la base de données intégrée à l'outil SOLO. Dans certains cas (montagne), on définit une station virtuelle en prenant les données de rayonnement d'une station météorologique proche et les données de température du site.

On peut calculer une valeur approchée de la température d'eau froide T_{ef} pour le mois i à partir des valeurs de la température extérieure par la formule suivante :

$$T_{ef}(i) = (T_e(i) + T_{em})/2$$

dans laquelle $T_e(i)$ et T_{em} sont les températures extérieures mensuelle (mois i) et annuelle.

On peut calculer une valeur approchée du rayonnement global horizontal journalier à partir du nombre d'heures d'ensoleillement journalier.

Pour le mois i , on a :

- $RGJ(i) = RJE(i) \times (0,19 + 0,62 \cdot HI(i)/DJ(i))$,
- $RJE(i)$: rayonnement journalier extraterrestre sur le site pour le mois i ,
- $HI(i)$: nombre d'heures moyen d'ensoleillement journalier pour le mois i ,
- $DJ(i)$: durée moyenne du jour sur le site pour le mois i .

RJE et DJ ne dépendent que de la latitude et du mois. Ils sont calculables par des équations astronomiques simples ou peuvent être trouvés dans des tables.

Données nécessaires sur les caractéristiques des composants (SOLO)

Ce sont :

- La surface unitaire et coefficients B & K des capteurs solaires,
- Le volume et la constante de refroidissement des ballons de stockage.

L'outil utilisé peut intégrer une base de données des caractéristiques des capteurs et des ballons. A défaut, on consultera les avis techniques des capteurs et les fiches constructeur des ballons.

Pour ces derniers, on peut aussi utiliser la formule : :

$$CR = \frac{24}{V_b} \left(1,1 + \frac{0,05}{V_b} \right) \times h \times S_b \quad \text{avec} \quad \frac{1}{h} = \frac{1}{10} + \frac{e_{iso}}{k_{iso}}$$

avec :

- V_b : volume du ballon (m^3) ;
- S_b : surface extérieure du ballon (m^2)
- e_{iso} : épaisseur de l'isolant (m) ;
- k_{iso} : conductivité de l'isolant ($W/m/K$)

Données économiques

Les données économiques sont :

- le coût d'investissement I en fonction de la surface Sc et du volume Vs,
- le prix de l'énergie d'appoint (en valeur mensuelle ou annuelle).

Une fois les ordres de grandeur de Sc et Vs fixés (pré-dimensionnement), on peut approcher I par une formule linéaire valable dans une petite plage pour Sc et Vs. :

$$I = I_0 + a \cdot Sc + b \cdot Vs \quad (a \text{ et } b \text{ sont deux coefficients à déterminer}).$$

Les critères de décision et les contraintes

Critères et contraintes définis avec le maître d'ouvrage :

- rentabilité économique de l'investissement,
- taux de couverture solaire minimal donné annuel,
- taux de couverture solaire minimal à certaines périodes,
- investissement limité,

Autres contraintes pouvant résulter de considérations pratiques :

- surface maximale disponible pour l'implantation des capteurs,
- choix d'orientation et d'inclinaison limités pour les capteurs, ombrages
- emplacement disponible pour le(s) ballon(s) de stockage.

Finalement, on doit généralement résoudre un problème de maximisation (ou minimisation) sous contraintes d'une fonction faisant intervenir les bilans énergétique et économique.

Les données économiques sont :

- le coût d'investissement I en fonction de la surface Sc et du volume Vs,
- Une fois les ordres de grandeur de Sc et Vs fixés (pré-dimensionnement), on peut approcher I par une formule linéaire valable dans une petite plage pour Sc et Vs. :

$$I = I_0 + a \cdot Sc + b \cdot Vs \quad (a \text{ et } b \text{ sont deux coefficients à déterminer}).$$

- le prix de l'énergie d'appoint (en valeur mensuelle ou annuelle).

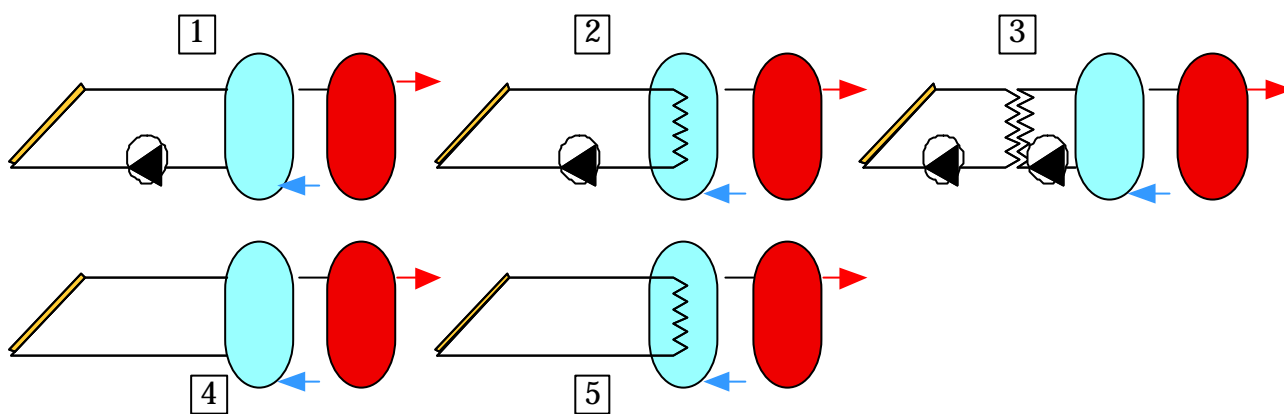
3.2.4.2 Définition des principes de l'installation

Choix du schéma de principe de l'installation

Ce choix doit se faire parmi les 5 schémas simples reconnus par SOLO. L'éventail est suffisant car les schémas plus complexes sont rarement efficaces en pratique en raison de problèmes de régulation et de fiabilité. Tous ces schémas comportent un appoint en série sur la sortie du système solaire.

Deux critères les différencient :

- la présence et la nature d'un échangeur éventuel entre capteur et stock,
- le moteur de la circulation du circuit capteur : thermosiphon ou pompe.



Schémas de principe reconnus par SOLO

Schéma 1 - Circuit capteurs-ballon : direct ; circulation : forcée

Schéma 2 - Circuit capteurs-ballon : échangeur interne; circulation : forcée, 1 pompe

Schéma 3 - Circuit capteurs-ballon : échangeur externe; circulation : forcée, 2 pompes

Schéma 4 - Circuit capteurs-ballon : direct ; circulation: thermosiphon

Schéma 5 - Circuit capteurs-ballon : échangeur interne; circulation : thermosiphon

Seuls les schémas 2 et 3 sont utilisés dans les installations collectives en France métropolitaine. En effet : d'une part, les circuits directs ne sont pas compatibles avec les risques de gel et la réglementation sanitaire ; d'autre part les contraintes du thermosiphon en termes d'installation (position des capteurs et du ballon) limitent son utilisation à de petits modules. Ces 2 schémas comportent les composants suivants à définir et dimensionner :

Schéma 2	Schéma 3
Échangeur interne	Échangeur externe
Capteurs	Capteurs
Tuyauteries Primaire	Tuyauteries Primaire
Pompe Primaire	Pompe Primaire
Échangeur interne	Échangeur externe
Ballon solaire	Tuyauteries Secondaire
Appoint & distribution	Pompe Secondaire
	Ballon solaire
	Appoint & distribution

Le choix se fait en fonction de la taille de l'installation. En dessous de 20 m² de capteurs, on utilise plutôt le schéma 2 et au-dessus plutôt le schéma 3.

3.2.4.3 Définition des types de composants

Une fois le schéma de principe déterminé, on peut limiter le choix des composants en définissant leur type. Dans la méthodologie présentée ici, rien n'interdit de remettre en cause à une étape ultérieure certains choix effectués à ce niveau. Cependant, cette remise en cause se traduira généralement par une perte de temps.

Capteurs

Pour une application de production d'eau chaude sanitaire, on utilisera en France des capteurs plans. L'utilisation de capteurs à tubes sous vide ne peut se justifier aujourd'hui, compte tenu de leur prix élevé, que dans deux cas :

- surface disponible limitée et recherche d'un taux de couverture élevé,
- besoins d'eau chaude à haute température et taux de couverture élevé.

Les particularités du site peuvent guider le choix précis du type de capteur. Par exemple, on privilégiera les capteurs plans de performances élevés (B élevé et K faible) si on est dans un des deux cas définis ci-dessus.

Si plusieurs modèles sont envisagés, on devra dimensionner une meilleure installation pour chacun de ces modèles puis faire le choix définitif en comparant les performances énergétiques et économiques des différentes solutions.

Échangeur

Les échangeurs externes seront des échangeurs à plaques. Les échangeurs intégrés seront du type à serpentins.

Ballons de stockage

Le stock sera composé d'un ou plusieurs ballons équipés d'une isolation thermique.

3.2.5 Pré-dimensionnement de l'installation

Nous avons choisi une méthode de dimensionnement en deux temps :

- pré-dimensionnement simple en tenant compte des contraintes,
- ajustement du pré-dimensionnement en fonction des résultats de SOLO

L'ajustement sera fait en effectuant plusieurs simulations avec SOLO. L'idée est de réduire progressivement les plages admissibles pour les différents paramètres du dimensionnement.

3.2.5.1 Problématique du pré-dimensionnement

Sur la base des principes (schéma et composants) définis dans l'étape précédente, on doit définir les ensembles de valeurs des paramètres principaux qui devront être validés à l'aide d'un calcul de performances par SOLO. Un bon pré-dimensionnement permet de limiter significativement le nombre de calculs à effectuer. Il concerne essentiellement la surface de capteurs (S_c) et le volume du stock (V_s).

On définit donc d'abord un couple central (SC_0, VS_0). Sauf exception, on est certain que les valeurs optimales respectives de SC et VS seront comprises dans les intervalles [$SC_0 - 50\%$, $SC_0 + 50\%$], [$VS_0 - 50\%$, $VS_0 + 50\%$] dans tous les cas.

En fonction des critères et des contraintes, ces plages peuvent être sensiblement restreintes.

Compte tenu de l'objectif limité du pré-dimensionnement, il est généralement possible de dimensionner séparément les capteurs et le stock. Ceci ne sera plus vrai lors du dimensionnement fin.

3.2.5.2 Pré-dimensionnement des capteurs solaires

Valeur centrale

La surface de capteurs Sc est la variable essentielle car elle conditionne le coût et la production utile du système. Dans notre approche, le pré-dimensionnement de Sc se fait sur la base du volume d'eau chaude consommé quotidiennement V_j .

Exemple : On définit Sc_0 de façon à avoir un ratio V_j/Sc_0 égal à 75 litres/m².

Soit 2000 litres/jour => $Sc_0 = V_j/75 = 2000/75 = 26,66 \text{ m}^2$ arrondis à 27 m²

Il est réducteur de ne considérer que la seule consommation d'eau chaude. L'exemple précédent peut en effet concerner aussi bien des besoins d'eau à 60°C à Nancy que des besoins d'eau à 45°C à Perpignan. Le premier cas correspondra alors à des besoins supérieurs de 70% au second cas et à une énergie solaire disponible inférieure de 30%.

Plage autorisée

En pré-dimensionnement, l'objectif est de définir une plage de variation intégrant les bonnes valeurs.

Vouloir définir finement a priori la valeur centrale afin d'avoir une plage de variation réduite complique les calculs sans apporter la garantie exhaustive sur les paramètres à prendre en compte.

Il est donc plus simple de prendre une valeur centrale approximative et une plage de variation plus étendue.

Notons également, qu'à ce niveau d'imprécision, il est inutile de faire la différence entre la surface utile et la surface hors-tout.

La plage autorisée sera l'intervalle $[Sc_{Min}, Sc_{Max}] = [Sc_0 - 50\%, Sc_0 + 50\%]$

A partir des données de l'exemple précédent, on obtient $[13 \text{ m}^2, 40 \text{ m}^2]$.

Cette plage est très large (rapport de 1 à 3) mais couvre à peu près tous les besoins d'eau chaude sanitaire en France. Il n'y a en effet que la production d'eau chaude pour des besoins à très haute ou très basse température qui pose des problèmes de dimensionnement.

Application des contraintes

Contrainte 1 : Coût d'investissement maximal autorisé I_{Max} .

On suppose que le coût d'investissement est donné par la formule:

$$I = I_0 + a \cdot Sc + b \cdot V_s ,$$

dans laquelle Sc et V_s sont respectivement la surface des capteurs et le volume de stockage.

Lors du pré-dimensionnement, on peut négliger le coût du stockage, ce qui revient à imposer une contrainte un peu plus faible que la contrainte initiale.

$$Sc_{MaxInv} = (I_{Max} - I_0) / a \quad Sc_{Max} = \min(Sc_{Max}, Sc_{MaxInv})$$

Contrainte 2 : Surface disponible pour les capteurs Sdispo.

On peut définir la surface maximale d'un champ de N rangées de capteurs inclinées d'un angle β sur l'horizontale en fonction de Sdispo par :

$$ScMaxSite = Sdispo / (Rs - \text{tg}(\beta) / N)$$

avec

$$Rs = 2 \cos(|\beta - 60^\circ|)$$

L'écart minimal C entre rangées est donné par :

$$\Delta C = 2\sqrt{3} \cdot \sin(\beta)$$

Inclinaison sur Horizontale (°)	0	15	30	45	60	75	90
Ratio Rs (S au sol/ S capteurs)	1.00	1.41	1.73	1.93	2.00	1.93	1.73
Écart entre capteurs de longueur L	0	0.45 L	0.87 L	1.22 L	1.5 L	1.67L	1.73 L

Dans cette configuration et pour une orientation vers l'équateur, les effets d'ombre sont très faibles. Par exemple, les capteurs ne se font aucune ombre avec un soleil plein sud à 30° au-dessus de l'horizon.

Pour des écartements plus faibles entre les rangées de capteurs, les ombrages devraient être pris en compte.

$$ScMax = \min(ScMax, ScMaxSite)$$

Choix de l'inclinaison

Le choix de l'inclinaison dépend essentiellement de deux paramètres :

- la latitude,
- la saisonnalité des besoins.

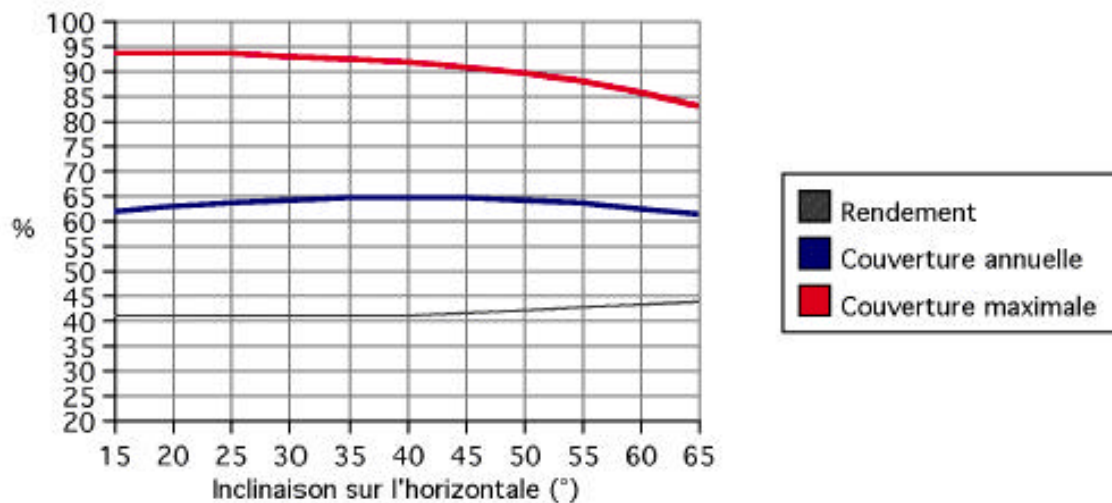
Dans la pratique, on utilise généralement un petit nombre d'inclinaisons standards (30°, 45°, 60°) pour des raisons pratiques. Ceci facilite la définition des supports et une variation de quelques degrés autour de la valeur optimale a une très faible influence sur les résultats.

En conséquence, on peut appliquer les règles de pré-dimensionnement suivantes :

- Si la consommation est constante ou quasi-constante sur l'année, l'angle d'inclinaison sur l'horizontale sera proche de la latitude : en France il est voisin de 45° afin qu'à l'équinoxe, l'incidence du rayonnement solaire soit normale à midi.
- Si la consommation est plutôt hivernale, on augmentera l'inclinaison de 15° (ce qui donne une inclinaison de 60° en France) afin d'avoir une incidence plus proche de la normale en hiver.
- Si la consommation est nettement estivale, on diminuera l'inclinaison de 15° (ce qui donne une inclinaison de 30° en France) afin d'avoir une incidence plus proche de la normale en été.

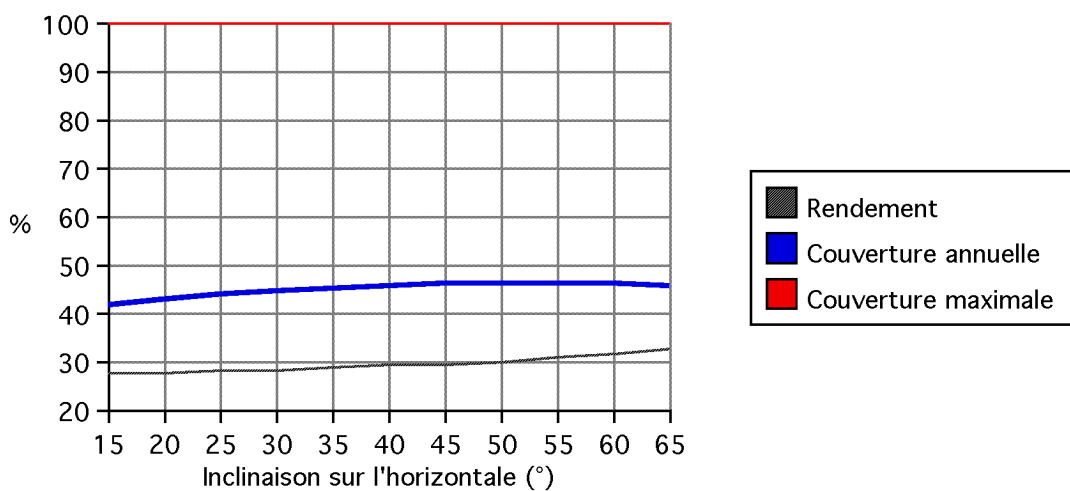
Le choix d'une inclinaison à 45° reste très peu pénalisant (1% à 3%), même avec des consommations saisonnières.

Par contre, répartir les consommations d'eau chaude (par exemple : 30% pour une consommation d'hiver ou 60% pour une consommation d'été) entraîne 10% de pertes

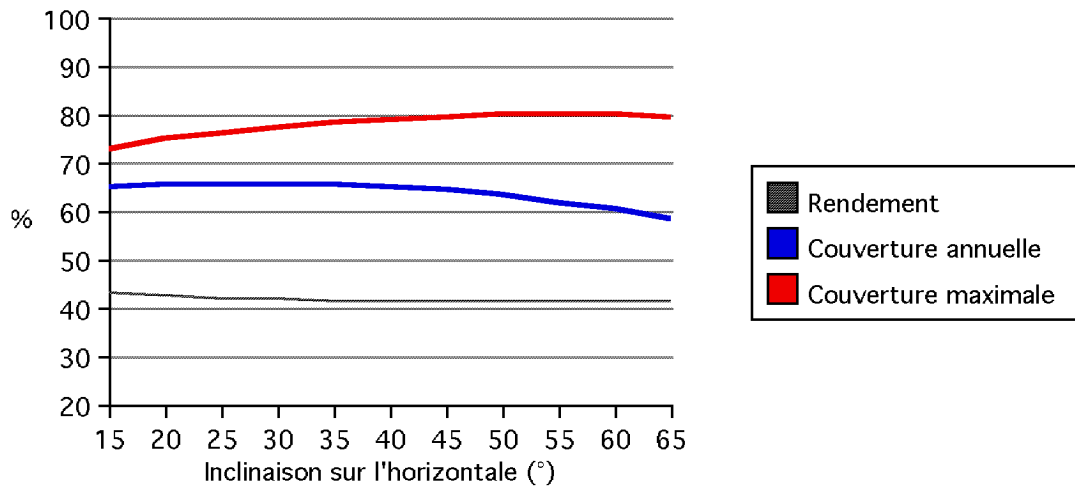


environ. Si la consommation est constante, l'effet est très faible entre 30° et 60°.

Conso. constante : Influence de l'inclinaison sur le rendement et les taux de couverture moyen et maximal



Conso hiver : Influence de l'inclinaison sur le rendement et les taux de couverture moyen et maximal



Conso été : Influence de l'inclinaison sur le rendement et les taux de couverture moyen et maximal

Le pré-dimensionnement des capteurs solaires

La surface de capteurs A est la variable essentielle car elle conditionne le coût et la production utile de l'installation.

- Recherche d'une valeur centrale
 - Le pré-dimensionnement de A est fait sur la base du volume d'eau chaude consommé quotidiennement V_j . On définit A_0 de façon à avoir un ratio V_j/A_0 égal à 50 litres/m².
 - Exemple : pour une consommation de 2000 litres/jour => $A_0 = V_j/50 = 2000/50$ soit 40 m²
- Définition de la plage de variation autorisée { $A_0 - 50\%$, $A_0 + 50\%$ }
- Application des contraintes
 - Contrainte 1 : Coût d'investissement maximal autorisé I_{Max} .
 - Contrainte 2 : Surface disponible pour les capteurs sur le site.
- Choix de l'inclinaison
 - Il dépend essentiellement de deux paramètres : la latitude et la saisonnalité des besoins. Dans la pratique, on utilise généralement des inclinaisons de 30°, 45°, 60°.

3.2.5.3 Pré-dimensionnement du stock

Valeur centrale

On définit le volume du stock en fonction de la consommation journalière :

$$V_{s0} = \max(V_{ja}, V_{j\acute{e}t\acute{e}})$$

avec :

- V_{ja} : consommation moyenne journalière sur la période de fonctionnement.
- $V_{j\acute{e}t\acute{e}}$: consommation moyenne journalière sur la période mai-août.

On veillera à tenir compte, prioritairement de la consommation d'été, car le stockage à entre autres fonctions, de limiter les surplus temporaires de production qui sont plus probables en été.

Plage autorisée

La plage autorisée est définie de manière similaire à la plage autorisée pour le dimensionnement de la surface de capteurs :

$[V_{SMin}, V_{SMax}] = [V_{s0} - 50\%, V_{s0} + 50\%]$ soit pour notre exemple : [1000 l, 3000 l].

Applications des contraintes

Des restrictions liées à la taille du local devant recevoir les ballons, peuvent conduire à réduire le volume V_{SMax} du stockage. Elles sont à étudier au cas par cas en fonction des ballons utilisés.

Contraintes liées à la méthode

La méthode SOLO n'est validée que pour un certain domaine d'utilisation (surface et volume). Le contrôle du respect de ce domaine est généralement effectué automatiquement par les outils basés sur SOLO. On veillera, en particulier à ce que la condition suivante soit vérifiée, pour rester dans le domaine de validité de la méthode de calcul :

$$20 < V_s / S_c < 300$$

En pratique, ce ratio est toujours respecté avec les règles de pré-dimensionnement proposées. Des précautions doivent cependant être prises si des contraintes d'installations très restrictives doivent être appliquées sur le volume du ballon ou la surface de capteurs.

Le volume des ballons de stockage est déterminé de la manière suivante :

- Recherche d'une valeur centrale : On définit le volume du stock en fonction de la consommation journalière : $V_0 = \max(V_{ja}, V_{j\acute{e}t\acute{e}})$
 - V_j : consommation moyenne journalière sur la période de fonctionnement
 - $V_{j\acute{e}t\acute{e}}$: consommation moyenne journalière sur la période mai-août.
- Définition de la plage de variation autorisée { $V_0 - 50\%$, $V_0 + 50\%$ }
- Application des contraintes
 - Contrainte 1 : Coût d'investissement maximal autorisé I_{Max} .
 - Contrainte 2 : Surface disponible pour l'installation des ballons
 - Contrainte 3 : Contraintes liées à la méthode SOLO ($20 < V/A < 300$)

3.2.5.4 Pré-dimensionnement du circuit primaire et de l'échangeur

Point de vue thermique

Du point de vue thermique, on s'intéresse à deux paramètres caractéristiques du circuit primaire et de l'échangeur, relativement à la surface de capteurs :

- le coefficient de pertes du circuit primaire par mètre carré de capteur (kt_1 en $W/°C/m^2$). *Il s'agit de m^2 de capteurs et non de la surface des tuyauteries,*
- le coefficient d'échange de l'échangeur par mètre carré de capteur ($Kéch_1$ en $W/°C/m^2$). *Il s'agit de m^2 de capteurs et non de la surface d'échange.*

On définit pour ces 2 paramètres, les objectifs qu'il faudra d'atteindre en faisant varier l'épaisseur de l'isolation des tuyauteries compte tenu de leur longueur, le type d'échangeur et la surface d'échange.

Le pré-dimensionnement vise à fixer les plages de valeurs qu'il conviendra d'utiliser lors du dimensionnement par SOLO, à partir des valeurs de référence :

- Tuyauteries du circuit primaire : $Kt_1 = 1W/°C/m^2$
- Échangeur : $Kéch_1 = 50W/°C/m^2$.

Il convient de noter qu'il s'agit là de caractéristiques théoriques minimales. En pratique, on choisira toujours un échangeur vérifiant $Kéch_1 \geq 100W/°C/m^2$.

Point de vue hydraulique

Il n'est pas nécessaire, lors du pré-dimensionnement, de préciser le détail des caractéristiques hydrauliques du système car elles n'interviennent pas dans les simulations, à l'exception des valeurs de débit massique dans les circuits primaire et secondaire qui sont prédéfinies dans la version simplifiée de SOLO. Nous traiterons donc ce point après le dimensionnement des capteurs et du stock.

3.2.5.5 Dimensionnement des capteurs et du stock

Une fois les données nécessaires recueillies et le pré-dimensionnement effectué, la méthode SOLO est utilisée pour effectuer un dimensionnement fin et calculer les performances de l'installation choisie.

La surface de capteurs Sc et le volume du stock Vs restent les paramètres essentiels du dimensionnement. Ils ne peuvent plus être considérés indépendants. On devra donc tester différents couples (Sc, Vs) et comparer les résultats obtenus sur la base des critères et des contraintes du projet. Le pré-dimensionnement a donné un couple central $(Sc0, Vs0)$ et des valeurs extrêmes $(Scmin, Scmax)$ et $(Vsmin, Vsmax)$.

On pourra utilement tester les couples suivants : $(Sc0, Vs0)$, $(Sc0, Vsmin)$, $(Sc0, Vsmax)$, $(Scmin, Vs0)$, $(Scmax, Vs0)$ afin de bien déterminer les différentes variantes possibles de dimensionnement.

Une bonne compréhension des interactions entre paramètres et performances du système permet de limiter le nombre de ces calculs.

Nous présentons ici une analyse de l'influence respective des capteurs puis du stock sur les performances.

Principes utiles pour les capteurs

Interprétation et exemple

Supposons une consommation journalière d'eau chaude constante. On analyse l'influence du dimensionnement des capteurs en considérant 4 caractéristiques :

- Vj : Consommation journalière (données des besoins : l/j)
- Sc : Surface de capteurs (paramètre de dimensionnement : m^2)
- R : Rendement moyen du système (résultat du calcul -)
- CS : Taux de couverture solaire (résultat du calcul : -)

De ces 4 caractéristiques, on peut tirer deux ratios simples qui caractérisent le dimensionnement de l'installation : Vj/Sc et R/CS .

Le pré-dimensionnement fixe la valeur du premier ratio Vj/Sc ($75l/m^2$) mais il peut être montré que ceci revient aussi à fixer la valeur du deuxième ratio (R/CS) pour le problème posé.

En effet :

Supposons fixées, les données (météorologie et besoins) du problème :

- $I1$: irradiation solaire annuelle par m^2 sur le plan des capteurs ($kWh/m^2/an$)
- $Ij1$: irradiation solaire moyenne journalière par m^2 ($kWh/m^2/j$).

On a :

- $I1 = 365 \cdot Ij1$
- Vj : consommation journalière d'eau chaude (litres/j)
- ΔT : échauffement moyen de l'eau : $Tec - Tef = Tec - Te$ ($^{\circ}C$)
- Tec : température de consigne d'eau chaude ($^{\circ}C$)
- Tef : température moyenne d'eau froide, supposée égale à Te ($^{\circ}C$)
- Te : température extérieure moyenne du site ($^{\circ}C$)

Le besoin énergétique moyen journalier B_j (kWh/j) et le besoin annuel B (kWh/an) s'écrivent en fonction de V_j et T , sachant que la capacité calorifique massique de l'eau est de $1,16 \text{ Wh/litre/}^\circ\text{C}$:

$$B_j = C_p.V_j.\Delta T = 1,16.V_j.\Delta T/1000 \quad B = 365 B_j = 0,423.V_j.\Delta T$$

La production solaire annuelle E (kWh/an) et la productivité annuelle $E1$ (kWh/m²/an) du système s'écrivent :

$$E = CS.B = Sc.R.I1 \quad E1 = R.I1 = B.CS/Sc$$

La production solaire moyenne journalière E_j (kWh/j) et la productivité moyenne journalière $E1j$ (kWh/m²/j) s'écrivent :

$$E_j = CS.B_j = Sc.R.I1j \quad E1j = R.I1j = B_j.CS/Sc$$

On en déduit :

$$R / CS = (B_j / I1j) / Sc \quad \text{ou encore : } R / CS = (1,16.V_j. T/I1j) / Sc / 1000$$

On constate que R / CS et V_j / Sc sont proportionnels de rapport k :

$$k = (R / CS) / (V_j / Sc) = (1,16.\Delta T) / I1j / 1000$$

De la même manière, les ratios $E1j / CS$ et V_j / Sc sont proportionnels de rapport k' :

$$k' = (E1j / CS)/(V_j / Sc) = 1,16.\Delta T/1000$$

et les ratios $E1 / CS$ et V_j / Sc sont proportionnels de rapport k'' :

$$k'' = (E1 / CS)/(V_j / Sc) = 0,423.\Delta T \quad \text{car } E1 = 365 E1j$$

Les coefficients de proportionnalité k' et k'' ne dépendent que de l'échauffement moyen de l'eau, l'influence du gisement solaire étant prise en compte dans $E1$ et $E1j$. Le coefficient k ne dépend que de ΔT et du gisement solaire. Dans tous les cas, les conditions météorologiques du site et la température de consigne suffisent à définir ces coefficients.

Dans le cas-type que nous avons considéré, à Perpignan on a, en valeurs arrondies :

$$\begin{aligned} I1 &= 4,7 \text{ kWh/jour ;} \\ T_e &= T = 15,5^\circ\text{C} \\ T_{ec} &= 45^\circ\text{C} \\ \Delta T &= 29,5^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$k = 0,00728 = 1/137 \quad k' = 0,0342 = 1/29 \quad k'' = 12,48$$

Le ratio de V_j/Sc de 75 l/m^2 correspond ici à un ratio $R/CS = 75/137$, soit $0,55$. De fait, le calcul réalisé avec SOLO pour $26,7 \text{ m}^2$ donne un taux de couverture solaire de 68% et un rendement de $37,7\%$, soit un ratio R / CS de $0,55$.

Si on raisonne en terme de la productivité annuelle, on a le même genre de résultat. Le ratio V_j/Sc de 75 l/m^2 correspond ici à un ratio $E1 / CS = 75 \cdot 12,48 = 936$. De fait, le

calcul réalisé avec SOLO pour 26,7 m² donne un taux de couverture solaire de 68% et une productivité annuelle de 636 kWh/an, soit un ratio R / CS de 936.

Cette proportionnalité entre les ratios R / CS , E1j / CS et Vj / Sc montre que choisir un ratio de dimensionnement Vj / Sc déterminé, revient en fait à imposer une valeur particulière aux ratios de performances R / CS et E1j / CS.

En particulier :

- Si on diminue le ratio Vj/Sc, on augmente le taux de couverture solaire, mais parallèlement le rendement diminue, le ratio R/CS diminue donc (plus vite que le taux de couverture solaire).
- Si on augmente le ratio Vj/Sc, on diminue le taux de couverture solaire, mais parallèlement le rendement augmente, le ratio R/CS augmente donc (plus vite que le taux de couverture solaire).

On voit que le rendement (ou la productivité) et le taux de couverture solaire sont deux objectifs antagonistes du dimensionnement. On est donc conduit à trouver un compromis entre les deux. Notons enfin que, Cs et R n'étant pas indépendants, il y a un et un seul couple (Cs,R) permettant d'atteindre un ratio R / CS donné.

Dans notre exemple à Perpignan, le ratio R / CS = 0,55 est atteint avec le couple (R = 37,7% ; CS = 68%). Le couple (44% ; 80%) qui donnerait le même ratio est impossible à atteindre puisqu'en passant d'un taux de couverture solaire de 68% à 80%, on fait chuter le rendement.

Exemples complémentaires

Les ratios k, k', k'' dépendent fortement des besoins et du site, ce qui ne fait que traduire les différences sensibles de performances des systèmes solaires suivant les sites et les besoins.

Le choix d'un ratio fixe Vj/Cs = 75 l/m² pour le pré-dimensionnement revient, en l'absence de tout autre critère, à favoriser l'augmentation du taux de couverture solaire par rapport à l'augmentation de rendement quand on passe de conditions moins favorables à des conditions plus favorables.

Voici quelques exemples de résultats obtenus dans différentes configurations :

Site	Te °C	Vj l	Sc m2	Bj kWh	B MWh	I kWh/m2/an	Vj/Sc l/m2	R/CS -	Cs -	R -	E1 kWh/m2/an
Perpignan	45	2 000	26.7		25.0	1 697	75.0	0.55	67.9%	37.5%	636
Perpignan	60	2 000	26.7		37.8	1 702	75.0	0.83	49.0%	40.8%	694
Perpignan	60	1 325	26.7		25.0	1 699	49.7	0.55	62.0%	34.2%	581
Perpignan	60	1 325	17.7		25.0	1 702	75.0	0.83	48.4%	40.2%	684
Paris-Trappes	45	2 000	26.7		29.6	1 233	75.0	0.90	47.9%	43.1%	532

Les cas 1 & 5 correspondent aux besoins standard : 2000 l/j d'eau à 45°C à Perpignan (1) ou à Paris (5). On voit que la couverture solaire est beaucoup plus faible à Trappes tandis que le rendement est légèrement plus élevé.

- La couverture solaire est beaucoup plus faible à Trappes car les besoins sont plus élevés (eau plus froide) et le rayonnement disponible est plus faible.
- Le rendement est légèrement supérieur à Trappes car les capteurs travaillent à température plus faible et qu'on a moins de surplus solaire les mois d'été.

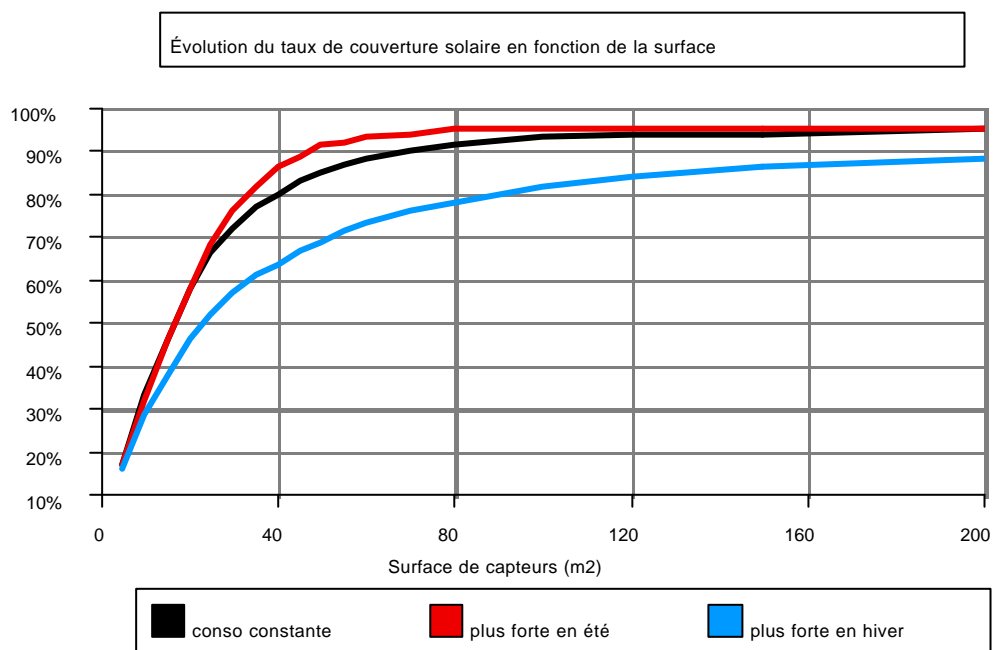
Les cas 2, 3 et 4 sont définis pour une température de 60°C. V_j reste à 2000 l dans le cas 2, ce qui correspond à une augmentation des besoins. Dans les cas 3 & 4, V_j est réduit pour retrouver les mêmes besoins énergétiques. Dans le cas 3, on garde la même surface S_c , dans le cas 4, on recalcule S_c pour avoir le ratio $V_j/S_c = 75$.

Effets saisonniers

Les phénomènes observés sont renforcés par les effets saisonniers. Pour le comprendre, reprenons l'exemple donné en 3.2.1.2. Nous avons vu que, sur notre cas-type, au-delà de 100 m², on ne gagnait plus rien. L'examen détaillé montre, par exemple, que le 120^{ème} m² a produit moins de 10 kWh utiles dans l'année, soit 3 kWh par mois de novembre à janvier, seulement 1kWh au total pour les 9 mois de février à octobre.

Explication : sauf en hiver, le taux de couverture solaire journalier dépasse 100% presque tous les jours (les derniers m² ne servent à rien). Par contre, les jours de mauvais temps, la production reste faible ou nulle. Le 120^{ème} m² n'est utilisé que par mauvais temps, et donc lorsqu'il produit peu, d'où un cumul sur 9 mois aussi faible.

Cet effet peut être aggravé ou, au contraire, atténué lorsque la consommation et les besoins varient suivant la saison. Reprenons le même exemple et la même consommation journalière en moyenne annuelle mais en faisant varier celle-ci suivant les mois. On peut tracer ainsi 3 courbes suivant la répartition de la consommation :



Une consommation plutôt estivale améliore légèrement les performances.

Une consommation plutôt hivernale est très pénalisante parce que le surplus de production d'énergie solaire en été est très élevé.

Le même système (40 m²) fournit donc suivant la saisonnalité de besoins : 64%, 80% ou 86% d'un même besoin énergétique annuel.

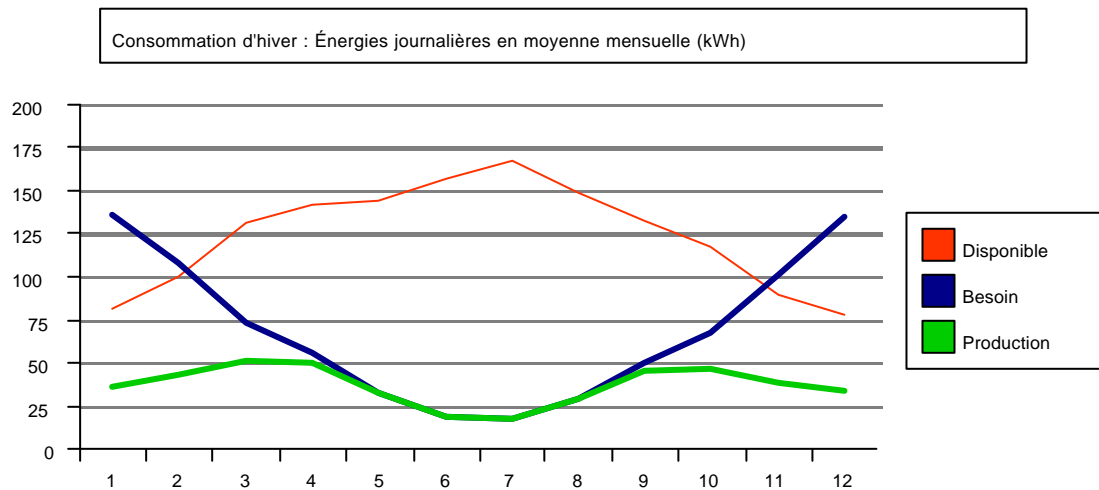
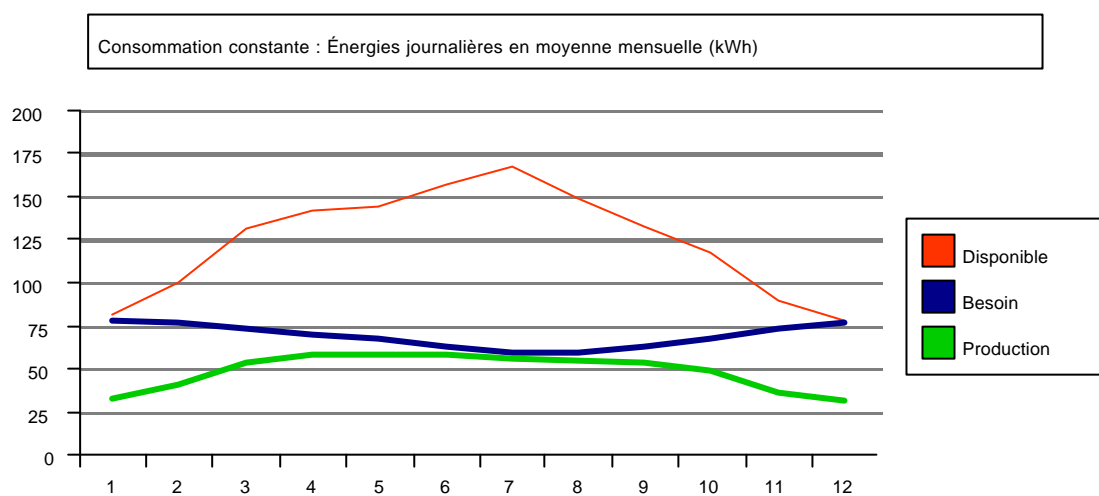
La productivité des capteurs est de 400, 500 ou 540 kWh/m²/an. Pour 30 m², on aurait

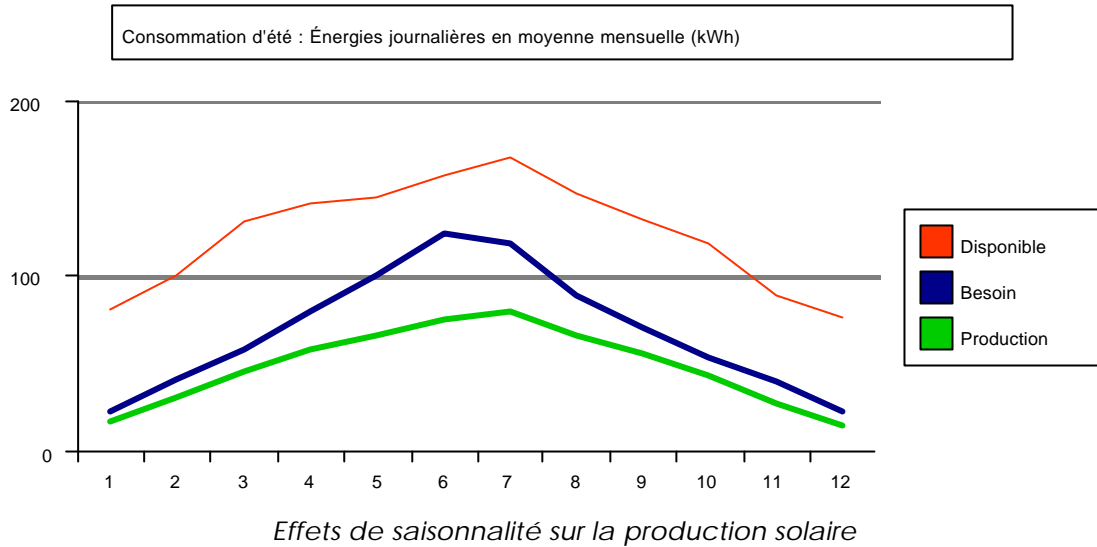
respectivement 475, 600 ou 635 kWh/m²/an pour un taux de couverture de 57%, 72% ou 76%.

Le ratio (surface de capteurs/consommation) devrait donc être réduit si on veut garder une bonne productivité avec une consommation essentiellement hivernale.

On voit que pour affiner le pré-dimensionnement, il faudrait aussi tenir compte de ces caractéristiques.

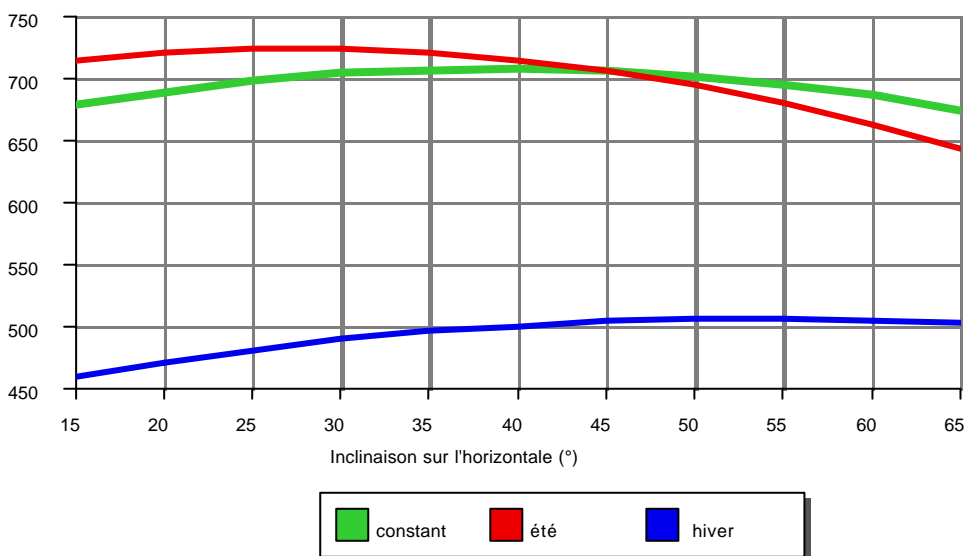
Les effets saisonniers sont clairement liés à des problèmes de saturation des besoins en été, comme on peut le voir sur les graphes ci-dessous qui montrent l'évolution de la production mois par mois en fonction de l'énergie solaire disponible sur le plan des capteurs et des besoins (cas-type : 2000l/j pour la consommation constante, Perpignan, 30 m²).





Influence de l'inclinaison

Le graphe ci-dessous montre les influences relatives de l'inclinaison et de la saisonnalité de la consommation sur la productivité des capteurs ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$) pour une installation située à Perpignan et pré-dimensionnée à $75\text{l}/\text{m}^2$.



Productivité en fonction de l'inclinaison et de la saisonnalité de la consommation

Principes utiles pour le stock

Rôle d'un stock journalier

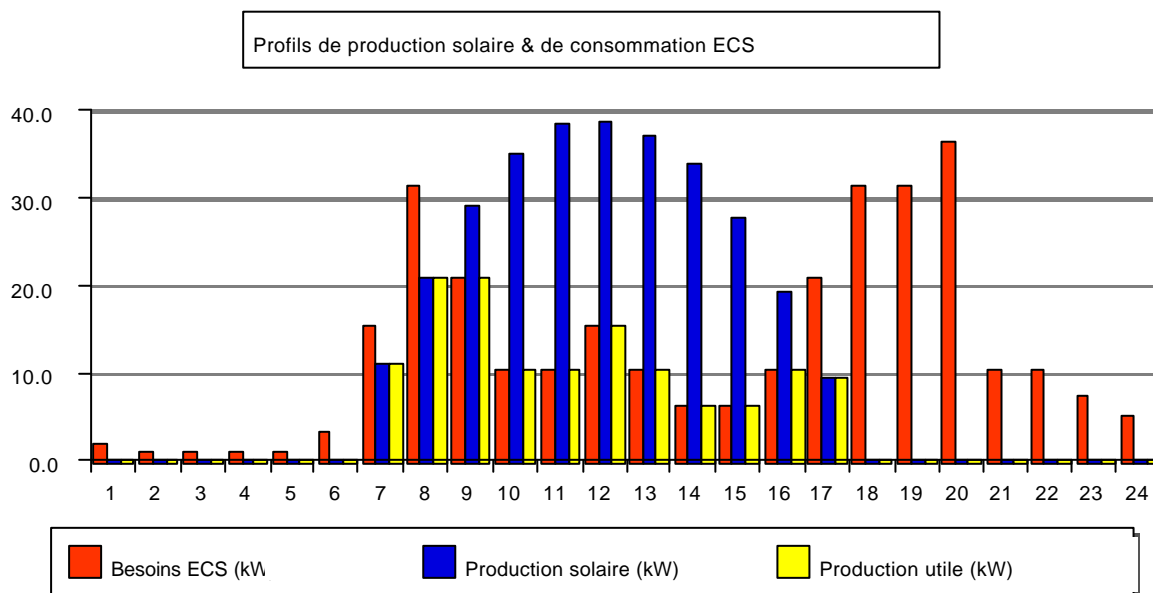
Le dimensionnement du stock est moins déterminant que celui des capteurs mais il ne doit pas être négligé pour autant. L'impact sur les performances n'est sensible que si le stock est fortement sous-dimensionné. Le pré-dimensionnement que nous avons défini : volume de stock équivalent à une journée de consommation, est à peu près toujours un compromis acceptable. On cherchera donc éventuellement à le réduire un peu pour diminuer le coût.

Une analyse du rôle du stock permet de justifier cette valeur de base et de comprendre dans quels cas, il pourra être nécessaire de l'adapter.

Le stock limite les effets de plafonnement de la production par les besoins en compensant partiellement le déphasage entre le profil de production solaire et le profil de consommation qui suivent essentiellement un cycle journalier :

- l'irradiation solaire, nulle la nuit, suit le jour une courbe en cloche,
- la consommation est souvent centrée sur 2 ou 3 pics horaires. Les pics les plus fréquents se situent vers 7h-8h le matin, vers 18h-20h le soir, parfois autour de midi. Ces pics sont souvent bien marqués : la consommation peut passer de 1 à 10 entre périodes de faible et de forte consommation.

Considérons une installation dans un hôtel, dimensionnée pour que la production journalière couvre juste les besoins, soit 300 kWh, pour une belle journée de mars. Les profils horaires sont donnés sur le graphique ci-dessous (valeurs en kWh).



La production solaire théorique est de l'ordre de 300 kWh mais la production utile en l'absence de stock n'est que seulement 132 kWh, soit moins de 50% du potentiel.

Avec un volume de stock égal à une journée de consommation, on évite un effet de surproduction sur la journée tout en limitant l'élévation de température dans les capteurs

qui serait préjudiciable au rendement de ceux-ci.

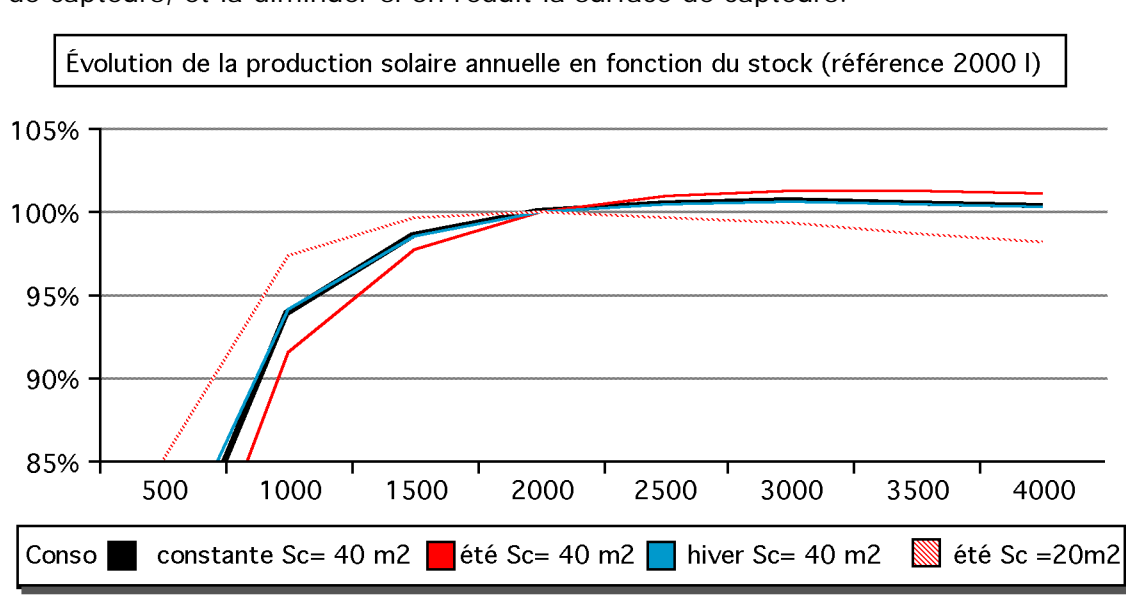
Influence des variations autour d'un stock journalier

Il n'est pas possible, pour des applications de production d'eau chaude sanitaire, de compenser les déphasages sur des périodes de longue durée (au-delà de la journée). Il faudrait pour cela augmenter très sensiblement le volume du stock, ce qui entraînerait :

- une augmentation significative du coût d'investissement, à mettre en parallèle avec des gains relativement modestes ;
- une diminution de la température moyenne du stock et donc de la qualité de l'énergie solaire produite : si l'eau froide est à 10°C, le stock à 40°C et la température de consigne à 50°C, l'appoint devra fournir 25% des besoins (chauffage 40°C à 50°C) quelle que soit la quantité d'énergie stockée.

Notons enfin sur le graphe suivant deux aspects importants du dimensionnement :

- La saisonnalité joue un rôle. L'utilité du stock dépend plus de la consommation d'été que de celle d'hiver.
- Le dimensionnement du stock dépend du dimensionnement des capteurs : pour des besoins identiques, on pourra augmenter la taille du stock si on augmente la surface de capteurs, et la diminuer si on réduit la surface de capteurs.



3.2.6 Ajustement des données relatives aux capteurs et au stock

Différentes techniques sont envisageables en fonction de l'expérience du concepteur et de la complexité du problème. Cependant, la démarche ci-dessous permet généralement d'aboutir à un résultat satisfaisant :

a) Définition d'une surface pseudo-optimale

- On utilise pour l'inclinaison des capteurs et pour le volume de stock les valeurs pré-dimensionnées V_0 et $Incl_0$. On effectue les calculs avec la méthode SOLO pour 3 valeurs de surface pré-dimensionnées : S_{min} , S_0 , S_{max} . On obtient ainsi les performances détaillées de ces installations (énergies, couverture solaire, productivité...).
- On calcule la valeur des autres paramètres intervenant dans le critère et les contraintes, en particulier des coûts (investissement et énergies).
- On en déduit la plage réduite (S_{min} , S_0), (S_0 , S_{max}) ou la plage de taille (S_{max} - S_{min})/2 centrée sur S_0 . (une bonne expérience de la conception permet de réduire la taille de la plage d'un facteur supérieur à 2).
- On répète l'opération jusqu'à obtenir une valeur pseudo-optimale S'_0 . La précision cherchée sera au mieux égale à la taille unitaire du capteur.

b) Ajustement de l'inclinaison et du volume du stock

- On effectue les simulations pour les triplets ($S'_0, Incl_0, V_{min}$), ($S'_0, Incl_0, V_{max}$), ($S'_0, Incl_{min}, V_0$), (S'_0, Inc_{max}, V_0).
- On calcule la valeur des autres paramètres intervenant dans le critère et les contraintes, en particulier des coûts (investissement et énergies).
- Pour l'inclinaison, la meilleure valeur est en général directement choisie. Pour le volume, la plage est réduite comme pour la surface et on répète le calcul.

c) optimisation de la surface de capteurs

Si on s'est sensiblement éloigné des valeurs pré-dimensionnées de l'inclinaison et du volume du stock, on reprend l'ajustement précis de la surface de capteurs en se basant sur les valeurs finales de l'inclinaison et du volume du stock. On ne teste qu'une plage très réduite autour de la valeur pseudo-optimale S'_0 : au pire [$S'_0-10\%$, $S'_0+10\%$], souvent [$S'_0-5\%$, $S'_0+5\%$], en fonction des différences observées sur les résultats obtenus.

Exemples : base : 7500l/jour d'eau à 50°C ($S_0 = 100$, $V_0 = 7500$)

Exemple 1 : Perpignan, critère TR contrainte $CS > 50\%$

Exemple 1' : Perpignan, critère TR contrainte $CS > 50\%$, conso été

Exemple 1 : Perpignan, critère TR contrainte $CS > 50\%$, conso hiver

Exemple 2 : Trappes, critère TR contrainte $CS > 50\%$

Exemple 2' : Trappes, critère TR contraintes $CS > 50\%$, surface limitée

3.2.7 Dimensionnement de l'échangeur

Les installations courantes sont dotées d'un échangeur entre le circuit primaire (circuit capteurs) et secondaire (circuit stock solaire), en particulier afin de permettre l'utilisation dans les capteurs d'un liquide antigel, indispensable en Europe pour une utilisation non limitée à l'été.

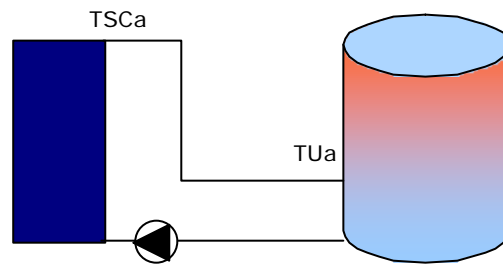
La présence de cet échangeur entraîne une baisse du rendement global du système car elle provoque, toutes choses étant égales par ailleurs, une augmentation de la température de l'eau dans les capteurs, et donc une augmentation des pertes thermiques des capteurs.

On peut évaluer la puissance utile P_u en sortie d'un système pour 2 variantes (sans échangeur, avec échangeur) par beau temps :

- capteur : caractéristiques $B = 0,8$; $K = 5 \text{ W/m}^2/\text{°C}$,
- pertes des circuit primaire et secondaire négligeables,
- puissance incidente : $I = 1000 \text{ W/m}^2$ et température extérieure = 20°C ,
- température moyenne de l'eau dans le capteur : $T_m = 60\text{°C}$,
- échangeur : coefficient d'échange unitaire $K_{éch1} = 100 \text{ W/°C}$ par m^2 de capteur.

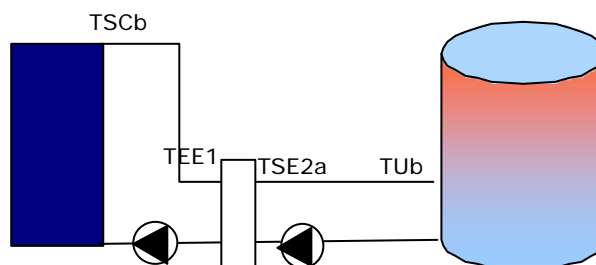
a) Sans échangeur : Température à l'entrée du stock $T_{Ua} = T_{SCa}$ (sortie capteur)

$$P_{ua} = B I - K (T_{ma} - T_{ext}) = 0,8 \times 1000 - 5 (60 - 20) = 600 \text{ W/m}^2$$



b) Avec échangeur : Température entrée du stock $T_{Ub} = T_{SE2a}$ (sortie secondaire)

Le transfert de la puissance utile à travers l'échangeur nécessite une différence de température $\Delta T_{éch} = T_{EE1} - T_{SE2}$ entre l'entrée côté primaire et la sortie côté secondaire.



Les pertes du primaire étant négligeables, on a :

$$TSCb - TUb = TSCb - TSE2 = TEE1 - TSE2 = \Delta T_{\text{éch}} = Pu / K_{\text{éch1}} = 700 / 100 = 7^{\circ}\text{C}$$

Pour avoir la même température d'entrée du stock : $TUb = TUa$, on doit avoir :

$$TSCb - TSCa = TSCb - TUa = TSCb - TUb = 7^{\circ}\text{C}$$

En première approximation, $Tmb - Tma = TSCb - TSCa$.

L'échauffement du capteur diminue la puissance utile proportionnellement au coefficient K du capteur :

$$Pub = B.I - K (Tmb - T_{\text{ext}}) = 0,8 \times 1000 - 5 (60 + 7 - 20) = 565 \text{ W/m}^2$$

On perd 35 W et 5% de rendement. On pourra retenir la valeur de 5 W/m^2 perdu par degré d'écart au niveau de l'échangeur.

La perte de rendement Δr par beau temps peut être évaluée, en première approximation, à :

$$\Delta r = K / K_{\text{éch1}} \quad (\text{dans notre cas, } r = 5 / 100 = 5\%)$$

Δr vaut environ 3% si $K_{\text{éch1}} = 150 \text{ W/m}^2 / ^{\circ}\text{C}$ mais 10% si $K_{\text{éch1}} = 50 \text{ W/m}^2 / ^{\circ}\text{C}$. C'est la valeur choisie pour les calculs de SOLO. En pratique, on ne descendra pas en-dessous de $100 \text{ W/m}^2 / ^{\circ}\text{C}$, ce qui limite la perte de rendement à 5% si $K_{\text{capteur}} = 5$.

Dans le cas d'un échangeur interne, normalement prédéfini par le constructeur du ballon, on vérifiera que le coefficient d'échange est du même ordre : $100 \text{ W/m}^2 / ^{\circ}\text{C}$.

3.2.8 Dimensionnement du circuit primaire : tuyauteries et pompes

Le rôle du circuit primaire est d'assurer la circulation de l'eau entre les capteurs et l'échangeur.

Ce circuit comprend :

- des tuyauteries de circulation, isolées,
- une pompe de circulation,
- un fluide de transfert antigel,
- des accessoires de sécurité (vannes d'isolement, clapets anti-retour, vannes de réglages du débit, purgeurs, vase d'expansion)

Dimensionnement hydraulique

Les paramètres de dimensionnement sont : le débit, le diamètre des tuyauteries, la puissance des pompes.

Le débit est proportionnel à la surface de capteurs. On utilise en général des débits voisins de 50 litres par mètre carré de capteur.

Les dimensionnements des tuyauteries et des pompes sont liés. En effet, il s'agit d'assurer le débit prévu dans les capteurs. En particulier, la perte de charge totale du circuit (capteurs compris) doit être inférieure à la perte de charge autorisée pour la pompe au débit prévu.

Le dimensionnement des tuyauteries sera défini pour respecter cette contrainte sur la perte de charge. La configuration et la longueur des tuyauteries étant généralement imposées, on devra jouer sur le diamètre des tuyauteries et éventuellement sur la puissance de la pompe.

À titre indicatif, on veillera à ne pas dépasser dans les tuyauteries une vitesse de 1 m/s.

Si on suppose un débit de 50 l/m²/h, cette condition impose une section interne des tuyauteries, exprimée en mm², voisine de 14 fois la surface de capteurs (exprimée en m²).

Par exemple, pour 100 m² de capteurs, on pourra avoir des collecteurs généraux de diamètre interne 42 mm (section 1400 mm²).

Les pertes de charges dans un circuit contenant une solution d'antigel (solution aqueuse de propylène glycol), seront plus élevées que dans un circuit contenant de l'eau, et ceci d'autant plus que la concentration en antigel sera plus élevée.

Pour des concentrations en antigel inférieures à 45% en poids, il convient de majorer les pertes de charges du circuit par les coefficients moyens suivants :

- Tube de cuivre : 1,2
- Tube d'acier : 1,1

Les pompes sont dimensionnées pour vaincre les pertes de charge du circuit sous la vitesse de circulation maximale autorisée par l'implantation du circuit hydraulique.

La perte de charge globale dépend de la configuration de l'installation. La perte de charge moyenne linéique sera typiquement de l'ordre de 10 mm de colonne d'eau par m de collecteur principal.

La puissance du moteur (en Watt) est déterminée par la relation :

$$P = (K \cdot Q \cdot H \cdot \rho \cdot g) / R$$

dans laquelle :

- Q est le débit en m³/s,
- H est la hauteur manométrique en mètres de colonne d'eau, calculée en tenant compte des pertes de charge du circuit et de la nature du fluide caloporteur,
- ρ est la masse volumique du fluide caloporteur en kg/m³,
- g est l'accélération de la pesanteur en m/s²,
- R est le rendement de l'ensemble pompe/moteur, qui devra être supérieur à 0,8.
- K est un coefficient de surpuissance, compris entre 1,15 et 1,25 pour s'affranchir des pertes de charge dues à l'entartrage des circuits (circuit secondaire) ou à la variation de viscosité du fluide antigel avec la température (circuit primaire).

Isolation thermique

Une mauvaise isolation des tuyauteries peut dégrader de manière notable, les performances d'une installation solaire.

Pour limiter les pertes thermiques, les tuyauteries doivent être les plus courtes possibles. On évitera en général de dépasser 3 à 5 m linéaires par m² de capteur solaire

L'épaisseur de l'isolant thermique des tuyauteries est choisie en fonction de ses propriétés thermiques. La résistance thermique du calorifugeage doit être au moins égale à celle d'un matériau de conductivité thermique $\lambda = 0,04 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, dont l'épaisseur sans finition est indiquée dans le tableau suivant.

Diamètre de la tuyauterie (mm)	Epaisseur de l'isolant $\lambda = 0,04 \text{ W /m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (mm)
<60	30
70 à 114	40
139 à 250	50
>250	60

L'isolation thermique du circuit primaire doit être assurée par un isolant protégé des agents extérieurs agressifs par une protection adéquate :

- à l'intérieur des locaux, le revêtement est réalisé soit par enduit armé, soit par des feuilles métalliques ou plastiques,
- à l'extérieur, l'isolant sera protégé des intempéries et des infiltrations d'eau par une protection appropriée (bandes bitumées et isolant non hydrophile par exemple).

Isolant	Conductivité thermique (W/m ² .°C)
Liège aggloméré	$\lambda = 0,048$
Liège expansé pur	$\lambda = 0,043$
Laine de verre	$\lambda = 0,041$
Polystyrène conforme à la norme NF T 56-201 Classe V	$\lambda = 0,037$
Isolant à cellules fermées (type Armaflex ou autre)	$\lambda = 0,035$
Mousse rigide de polyuréthane, conforme à la norme NFT 56-203, expansée en continu	$\lambda = 0,024$

Dans le cas de l'utilisation de demi-coquilles préformées, celles-ci seront posées à joints alternatifs et maintenues par cerclage en fil, bandes ou feuillards non oxydables à l'intervalle maximum d e 0,50 m avec un minimum de 3 par longueur de demi-coquille.

3.2.9 Dimensionnement des accessoires de sécurité

Vase d'expansion

Les méthodes applicables à la protection des installations solaires relèvent du DTU 65.11. Elles concernent essentiellement les vases fermés.

La tuyauterie d'expansion doit permettre l'écoulement du débit de fluide caloporteur correspondant à la dilatation la plus rapide, avec une vitesse inférieure à 0,1 m/s.

Le diamètre nominal d (mm) de la tuyauterie d'expansion peut être calculée par la formule approchée :

$$d = 120 (\alpha \cdot P / \rho \cdot C_p)$$

avec :

- P : puissance maximale du champ de capteur (kW),
- C_p : capacité calorifique du fluide caloporteur (J/kg),
- α : coefficient de dilatation volumique moyen du fluide caloporteur entre 0 °C et 110 °C,
- ρ : masse volumique du fluide caloporteur à la température de 110 °C et à la pression correspondante .

La capacité utile du vase d'expansion doit être au moins égale au volume correspondant à la dilatation du fluide caloporteur du circuit primaire entre 0 °C et 110 °C. (soit environ 10 % du volume du circuit primaire)

Pour les vases fermés, cette condition doit être réalisée en respectant la pression maximale d'utilisation, en tous points de l'installation.

Lorsque le vase d'expansion comporte une membrane, celle-ci doit être compatible avec le liquide caloporteur.

Aucune vanne ne doit être installée sur les éléments de tuyauteries situés entre le vase d'expansion et le circuit primaire

L'expansion du liquide caloporteur dans l'installation doit être compensée par le vase. Le volume V du vase doit être légèrement plus grand que le volume d'expansion du liquide. Il est déterminé à partir du volume total de l'installation par la relation :

$$V = V_c \cdot K_d / \eta$$

dans laquelle :

- V_c est le volume total du fluide caloporteur (l),
- K_d est le coefficient de dilatation à la température maximale d'utilisation (température de stagnation des capteurs) (%),
- η est l'effet utile du vase ($\eta = (P_2 - P_1) / P_1$ avec P_2 : pression absolue d'ouverture des soupapes du vase et P_1 : pression absolue de gonflage du vase).

Purgeurs

Chaque point haut du circuit primaire doit être équipé de purgeurs (purgeurs automatiques ou bouteilles de purge). Un soin particulier doit être apporté aux purges des points hauts en chaufferie. Avec des purgeurs automatiques, les pompes devront être installées de manière à maintenir l'ensemble du circuit à purger en surpression.

Soupapes

Les soupapes de sécurité doivent être conformes à la norme NFP 52-001 et être tarées à une pression inférieure à la pression maximale de service de l'installation.

Elles seront placées directement sur le collecteur de sortie des capteurs, sans organe d'obstruction entre les capteurs et la soupape.

S'il n'existe pas d'autre protection contre les surchauffes, et pour éviter toute surpression dans une installation fermée, la soupape de sécurité devra être choisie de telle manière qu'elle puisse évacuer un débit de vapeur correspondant à la pression maximum reçue par les capteurs, sans que la surpression effective par rapport à la pression nominale de service dans les absorbeurs puisse dépasser 0,5 bar.

Le diamètre intérieur minimal du tube de sécurité peut être calculé en fonction de la puissance maximale P reçue par le champ de capteurs, par la relation :

$$d \text{ (mm)} = 15 + 1,4P$$

Avec : $d > 26 \text{ mm}$ et P en kW

3.3 L'évaluation du projet

3.3.1 L'évaluation technico-économique

Au stade de l'étude préalable, l'évaluation technico-économique doit être réalisée dans une perspective de Garantie de Résultats Solaires (GRS).

Pour cela, elle comporte :

- une estimation du montant des travaux pour la réalisation de l'installation avec un coût d'objectif global,
- une estimation des coûts annuels pour l'entretien, la maintenance des équipements, ainsi que pour le contrôle à distance (télécontrôle, télémessure...),
- des hypothèses de coût de référence de l'énergie traditionnelle (énergie substituée ou énergie d'appoint),
- la production énergétique annuelle attendue,
- l'impact environnemental (CO2 évité)
- le temps de retour brut
- le coût global actualisé sur la durée de vie de l'installation

Investissement

L'investissement comprend l'ensemble des coûts relatifs à la conception de l'installation, aux équipements, à leur installation et à la formation des personnels d'exploitation et de maintenance.

Coût d'exploitation

Le coût d'exploitation est une grandeur difficile à estimer a priori, puisqu'il dépend largement de la performance de l'installation et des conditions réelles d'utilisation de l'eau chaude sanitaire (besoins, usages, conditions de soutirage...).

Le coût d'exploitation est calculé à partir du coût de l'énergie utilisée par le système d'appoint et les équipements auxiliaires (pompes, réchauffeurs...). Il inclut également le coût des services de maintenance et de télécontrôle, ainsi que les coûts liés au personnel d'exploitation. Le cas échéant, le coût d'exploitation peut inclure le coût annuel des emprunts nécessaires au financement de l'investissement.

$$Opc_o = \sum_{M=1}^{12} (Enco) + Adopco$$

dans laquelle :

- Opc_o : coût d'exploitation en Euro
- M : indice du mois considéré
- $Enco$: coût mensuel de l'énergie en Euro
- $Adopco$: coûts additionnels en Euro

Coûts de maintenance

Les coûts de maintenance concernent l'ensemble des coûts liées à l'entretien, la réparation ou le remplacement de tout ou partie des équipements de l'installation solaire de production d'eau chaude.

Temps de retour brut

Le temps de retour brut est le temps au bout duquel la somme des économies financières réalisée par la substitution de l'énergie solaire à l'énergie traditionnelle est égale au montant des investissements. Le temps est généralement le nombre d'années qui satisfont l'équation suivante :

$$\sum_{i=1}^n Sav_i = Invco$$

dans laquelle :

- Sav_i : économies d exploitation et de maintenance pour l'année i , en Euro
- i : indice de l'année considérée
- $Invco$: montant de l'investissement en Euro

Le temps de retour brut est un critère souvent utilisé en première analyse, par les financiers, pour juger de l'intérêt d'une installation solaire.

Coût global actualisé

L'analyse en coût global des solutions propose l'évaluation sur un horizon économique donné, de l'ensemble des coûts initiaux liés à l'investissement et de ceux liés à l'exploitation : coûts de fonctionnement, coûts de maintenance, frais financiers, remboursement d'emprunts..., sur une période économique définie. Elle est généralement utilisée pour affecter un budget à une opération ou pour juger de l'intérêt économique de propositions diverses.

De nombreuses formulations du Coût Global Actualisé (CGA) existent, nous avons retenu ici la formule suivante :

$$CGA = CI + na \bullet CE$$

$$na = \sum_{i=1}^{nH} \frac{1}{(1 + \tau_a)^i}$$

avec :

- CI : Coût d'Investissement
- CE : Coût d'Exploitation
- τ_a : Taux annuel d'actualisation
- nH : Durée sur laquelle est effectué le calcul du Coût Global Actualisé.

3.3.2 La Garantie de Résultats Solaires

La Garantie de Résultats Solaires est un engagement du fabricant de capteurs solaires, de l'installateur et de l'exploitant, assistés du bureau d'études, sur la production énergétique annuelle de l'installation solaire projetée.

L'installation solaire est équipée d'un dispositif de télésurveillance qui permet, mois après mois, de comptabiliser l'énergie solaire.

Au terme d'une année de fonctionnement, un bilan est établi :

- a) Si l'énergie produite par le système solaire est au moins équivalente à 90 % de l'énergie calculée, les mesures se poursuivent pendant quatre années supplémentaires.
- b) Dans le cas contraire les entreprises ont un double choix :
 - remettre à niveau, à leur frais, l'installation pour atteindre les objectifs,
 - dédommager le maître d'ouvrage du déficit d'énergie solaire.

Dans tous les cas et pendant cinq années consécutives, la production réelle de l'installation doit être au moins 90 % de la production calculée.

Les performances de l'installation solaire seront calculées selon la "Méthode mensuelle d'évaluation des performances thermiques des installations solaires" (Méthode Solo).

L'obligation de résultat entraîne la nécessité de pouvoir surveiller à tout moment le bon fonctionnement de l'installation et d'effectuer pour la durée du contrôle la mesure des performances de l'installation.

A cet effet, l'installation solaire est munie d'un télécontrôleur raccordé au réseau téléphonique (ligne téléphonique à réception simple à la charge du Maître d'Ouvrage).

La fonction d'un télécontrôleur interrogeable à distance par le réseau téléphonique commuté est double :

- assurer un contrôle permanent des performances de l'installation solaire et du fonctionnement de tous ses organes,
- informer immédiatement le responsable d'exploitation de toutes défaillances ou mauvais fonctionnement de l'un des appareils de l'installation.

Il est, de ce fait, un outil essentiel à l'obtention des résultats "garantis".

Dans le cadre de la procédure de **GRS^{Thermique}**, toute étude de faisabilité d'une installation solaire thermique de production d'eau chaude sanitaire, devra contenir au minimum les éléments détaillés suivants:

1. Introduction - Présentation

- Présentation du Maître d' Ouvrage et de ses motivations
- Type d'établissement, situation et taille
- Type de projet : neuf ou réhabilitation

2. Description de l' installation à équiper (neuf ou existant)

- Type de besoins, fréquentation, saisonnalité
- Consommations journalières et profils annuels, mensuels, hebdomadaires
- Installation énergétique existante ou prévue, à remplacer ou à utiliser comme appoint.
- Taille des ballons de stockage existants ou prévus.

3. Principe général de fonctionnement, hors solaire

- Fonctions assurées par la chaufferie. Régulation
- Description des matériels en place (ou prévus)

4. Travaux proposés

- Description du nouveau principe de fonctionnement
- Description technique des travaux proposés:
 - Capteurs solaires, circuit primaire, y compris Génie Civil
 - Aménagements en local technique: hydraulique, Gros Œuvre
 - Électricité et régulation
 - Essais et mise en route
 - Télécontrôle

5. Coût des travaux

- Évaluation du montant des travaux, poste par poste
- Coût d'objectif total
- Coûts annuels: maintenance et télécontrôle par an.
- Hypothèses économiques:
 - coût de référence de l'énergie traditionnelle (substituée ou appoint)
 - production énergétique annuelle attendue, impact environnemental (CO2).
 - Temps de Retour Brut, Cout Global Actualisé

6. Annexes

- Bilan énergétique annuel prévu, en valeurs mensuelles (méthode Solo)
- Schéma d'ensemble des installations existantes ou projetées
- Schéma hydraulique de l'installation solaire prévue
- Schéma général d'implantation (capteurs, stockage, appoint).

Plan type d'étude de faisabilité

3.3.3 L'impact environnemental

La température moyenne de la Terre résulte de l'équilibre entre le flux de rayonnement qui lui parvient du soleil et le flux de rayonnement infrarouge renvoyé vers l'espace.

La répartition de la température au niveau du sol dépend de la quantité de gaz à effet de serre (GES) présents dans l'atmosphère.

Sans eux, la température moyenne serait de -18°C et la terre serait inhabitable. Leur présence maintient cette température à 15°C .

Les gaz responsables de l'effet de serre d'origine anthropique sont le gaz carbonique (CO_2), le méthane (CH_4), l'oxyde nitreux (N_2O), l'ozone troposphérique (O_3), les CFC et les HCFC gaz de synthèse responsables de l'attaque de la couche d'ozone, ainsi que les substituts des CFC : HFC, PFC et SF₆.

Les gaz à effet de serre sont naturellement très peu abondants. Mais du fait de l'activité humaine, la concentration de ces gaz dans l'atmosphère s'est sensiblement modifiée : ainsi, la concentration en CO_2 , principal GES, a augmenté de 30% depuis l'ère préindustrielle.

Les effets combinés de tous les GES équivalent aujourd'hui à une augmentation de 50% de CO_2 depuis cette période.

L'utilisation de l'énergie solaire en relève d'installations existantes permet de diminuer les rejets dans l'atmosphère, de gaz carbonique (CO_2).

Pour chaque kWh utile économisé, la quantité de CO_2 évitée, de la source de production d'énergie jusqu'à l'usage final (après transformation par les équipements de production d'ECS) en France métropolitaine, est :

Source d'énergie	CO_2 évité (kg/kWh)
Fioul domestique	0,35
Gaz naturel	0,28
Charbon	0,36
Electricité	0,12 (valeur moyenne en France métropolitaine. La valeur moyenne européenne est proche du double)

(Source : Inestene/Mission Interministérielle de l'Effet de Serre)

Pour rendre plus concret l'impact positif de la réalisation d'une installation solaire de production d'eau chaude sanitaire, on peut comparer la quantité de gaz carbonique évitée à la quantité de CO_2 produite par une automobile de petite taille.

Ainsi, 1 m² de capteur solaire qui remplace un chauffe-eau au fioul en évitant l'émission de 350 kg de CO_2 par an, évite l'équivalent de la quantité de CO_2 émise par une voiture de petite taille qui effectuerait un parcours de 2500 km.

4. Exploitation et maintenance

4.1 Remplissage

Avant remplissage de l'installation, et sauf disposition contraire des Règles Particulières d'installation, le circuit primaire sera rincé à plusieurs reprises.

Lors de l'installation des capteurs, il y a lieu d'éviter le renversement de tout fluide susceptible d'incompatibilité avec le revêtement d'étanchéité ou les éléments de couverture. Le remplissage sera effectué sous la protection d'un groupe de sécurité taré à une pression inférieure à la pression maximale d'utilisation portée sur la plaque d'identification des capteurs.

L'installation devra comporter un dispositif de disconnexion permettant le remplissage en liquide caloporteur. Le dispositif de remplissage sera tel qu'il ne permettra pas un quelconque retour de fluide caloporteur ou d'eau de rinçage du circuit primaire vers le réseau d'eau potable.

Un compteur volumétrique placé en aval du poste de remplissage permettra de mesurer la fréquence et l'importance des rajouts dans le circuit primaire. Chaque opération de remplissage du circuit primaire doit être consignée dans un registre de chaufferie (Article 16.7 du Règlement Sanitaire Départemental Type)

4.2 Mise en service

L'étanchéité de l'installation est vérifiée lors de la mise en service.

L'épreuve d'étanchéité de l'installation doit s'opérer à la pression normale d'utilisation. Lors de la première montée en température, il y a lieu de surveiller la montée en pression ainsi que le fonctionnement des dispositifs de protection et de sécurité.

On vérifie que tous les appareils ne subissent pas de détérioration et qu'ils ne se déplacent pas sur leurs supports, que les dilatations se font sans bruit et sans donner lieu à des déformations anormales.

Le réglage du dispositif de régulation sera effectué conformément aux dispositions figurant dans la notice établie par le fabricant. Lorsqu'il y a moyen de régler le débit, il devra être réglé, sauf dispositions particulières indiquées dans le dossier de l'étude, à des valeurs comprises entre 40 et 80 kg/h et par m² de capteur.

4.3 Réception de l'installation

Exemple de procès verbal de réception d'une installation solaire

PROCES VERBAL DE RECEPTION SUR SITE

Type d'installation:		Date 1:	Date 2:		
Adresse:		Maître d'Ouvrage:			
Installateur:		Maître d'Œuvre:			
		Autre (s):			
		Date 3:			
POSTE / FONCTION	OBSERVATIONS	Valeurs Mesures	DECISION		
			Réserve	Visite 2	Visite 3

CAPTEURS						
Type	nombre					
	marquage					
	aspect					
	accès					
	raccordements					
Montage	orientation					
	inclinaison					
	masques					
Supports	corrosion					
	tenue mécan.					
	démontage					
Fixations	ancrage					
	fondations					

COLLECTEURS		longueur	diamètre	isolant		
capteurs >>> batteries						
bateries >>> collecteurs						
collecteurs >>> échangeur						

POSTE / FONCTION		OBSERVATIONS	Valeurs Mesures	DECISION		
				Réserve	Visite 2	Visite 3
LOCAL TECHNIQUE						
Local	localisation					
	accès					
	ventilation					
Pompe 1	marque, type					
	nombre					
Pompe 2	marque, type					
	nombre					
Echangeur	marque, type					
	puissance					
Expansion	marque, type					
	capacité					
	pression nom.					
Fluide 1	référence					
	volume					
Indicateurs	thermomètres					
	manomètre					
	compteur					
ARMOIRE GENERALE						
localisation						
accessibilité						
protection mécanique						
sectionneurs						
fusibles						
étiquetage						
plans						

POSTE / FONCTION	OBSERVATIONS	Valeurs Mesures	DECISION		
			Réserve	Visite 2	Visite 3
REGULATION					
localisation					
type, marque					
lisibilité, accessibilité					
position des sondes					
facilité de maintenance					
voyants					
seuils					
électro-vannes					
tests					
PROTECTIONS					
Terre	armoire générale				
	prises murales				
BALLON SOLAIRE					
marque, type					
volume					
nombre					
situation					
isolant					
raccordements					

POSTE / FONCTION	OBSERVATIONS	Valeurs Mesures	DECISION		
			Réserve	Visite 2	Visite 3
TELECONTRÔLE					
installation					
sondes températures					
compteur ECS					
poids impulsions					
entrées logiques					
raccordements					
alimentation					
protections (alim, foudre)					
ligne téléphone					

DOCUMENTATION					
plans de réalisation					
nomenclature					
résultats d'essais					
consignes sécurité					
consignes entretien					

DIVERS					
Assurance					

REMARQUES GENERALES, RECOMMANDATIONS, CONCLUSIONS					

SIGNATURES

Maître d'Ouvrage

Maître d'Œuvre

Installateur

4.4 Entretien périodique

Chaque installation devra faire l'objet d'un contrat d'entretien de type P2 portant au minimum sur les installations de production d'eau chaude solaire et exclusivement solaire et assorti d'une clause de garantie de résultats qui prendra effet à de la date de réception des travaux.

4.4.1 Périodicité et contenu des interventions d'entretien

Le responsable d'entretien pourra intervenir sur les installations autant de fois qu'il le jugera utile. Toutefois un contrôle général de l'installation devra être réalisé tous les trimestres et consigné sur un cahier d'entretien qui sera laissé dans le coffret électrique du local technique.

Lors de chacun de ces contrôles seront effectués,

a) en local technique :

- la vérification de la pression du circuit primaire sur le manomètre installé à proximité du vase d'expansion et de la soupape de sécurité, (pression normale > 2 bars à froid),
- la manœuvre de la soupape de sécurité du circuit primaire (manœuvre, rapide pour éviter toute baisse de pression du circuit, destinée à décoller éventuellement le clapet),
- l'inversion des moteurs des circulateurs doubles primaire (P1/P2) et secondaire (P3/P4) avec purge éventuelle du circulateur.
- la mesure de la pression différentielle du circulateur primaire,
- la mesure du débit du circuit primaire sur le compteur volumétrique et à l'aide d'une montre,
- la lecture des températures à l'échangeur (entrée et sortie primaire et secondaire), et des températures ballons,
- le contrôle des purgeurs d'air automatique,
- la manœuvre de toutes les vannes sans omettre de les remettre aussitôt en position initiale,
- la manœuvre des soupapes 7 bars à l'entrée de chaque ballon,
- la vérification du fonctionnement des compteurs volumétriques (rotation en période de circulation),
- d'une manière générale l'absence de fuites et le bon fonctionnement de tous les organes et notamment l'absence de bruit anormaux (bruits des circulateurs).

b) au niveau des capteurs :

- le contrôle général des capteurs et notamment l'état de salissure des vitrages et des absorbeurs.
- le contrôle des purgeurs d'air automatique,
- le contrôle, en période d'ensoleillement au moyen d'un thermomètre à contact ou plus simplement à la main de la température de sortie de chaque batterie de capteur,
- la vérification du bon positionnement des vannes de réglage et la manœuvre des vannes 1/4 de tour.

NOTA : Les purgeurs d'air automatiques sont équipés d'un clapet qui permet leur démontage et nettoyage éventuel (si fuite permanente) sans vider l'installation.

4.4.2 Justification des contrôles et des opérations d'entretien

Seront indiqués, à chaque visite trimestrielle, sur le cahier d'entretien :

- le nom de l'intervenant,
- la date, l'heure, le temps (ensoleillé, passages nuageux, nuageux),
- la pression du circuit primaire,
- l'état des circulateurs primaire et secondaire,
- le repérage des circulateurs en fonctionnement (primaire et secondaire),
- le résultat de la mesure de la pression différentielle du circulateur primaire,
- le débit du circuit primaire,
- les températures entrée et sortie primaire et secondaire de l'échangeur.
- la température de chaque ballon,
- l'index des 2 compteurs volumétriques,

et, d'une manière générale toute anomalie constatée et toute intervention réalisée (nettoyage des capteurs, dépose et nettoyage de purgeur.....)

Toute anomalie apparente constatée sur l'installation devra être immédiatement signalée au maître d'ouvrage ou à son représentant.

4.4.3 Limites de la prestation d'entretien

La prestation du responsable d'entretien couvre :

- le remplacement (fourniture et main d'œuvre) de tous les petits matériels de type consommables (joints d'étanchéité, fusibles, voyants),
- les réparations éventuelles de fuites sur les circuits hydrauliques,
- la réalisation des compléments éventuels de remplissage du circuit primaire,
- Pression de remplissage : 2,5 bars à froid,
- Pression minimale : 1,5 bar à froid,
- le remplacement éventuel de matériels tenus en stock (vitres capteurs),
- la réalisation de vérifications, autres que les vérifications courantes ci-après décrites, demandées par l'installateur ou le maître d'œuvre.

Tout remplacement de gros matériels ne pourra s'effectuer qu'après réalisation d'un devis dûment accepté par l'ensemble des parties.

4.5 Le télésuivi

Le télésuivi d'une installation solaire a deux objectifs principaux :

- permettre l'établissement des bilans énergétiques de l'installation
- faciliter la détection et le diagnostic des dysfonctionnements éventuels et ce faisant, améliorer le rendement de l'installation et la sécuriser

En particulier, le télésuivi est indispensable pour les contrats de garantie de résultats solaires car ces deux fonctions sont nécessaires dans ce cadre pour :

- établir des bilans et vérifier le respect de la garantie,
- détecter des défauts qui entraîneraient un non-respect de la garantie.

Le télésuivi a un coût :

- coût de l'investissement initial (télécontrôleur et sondes de mesure),
- coût de fonctionnement (transmission et traitement des données).

Ce coût est à peu près indépendant de la taille de l'installation. Il est donc acceptable pour une installation collective de grande taille mais trop important pour un chauffe-eau individuel.

Actuellement, le télésuivi se justifie économiquement au-delà de 40 m² de capteurs. L'automatisation de l'analyse et l'évolution des matériels devraient permettre de faire baisser ce seuil.

Description du télésuivi

Le télésuivi comprend généralement trois composantes :

- la mesure des paramètres essentiels de fonctionnement,
- le stockage, la mise en forme et la transmission de ces paramètres,
- l'analyse des résultats.

Une station locale reliée à des sondes de mesure et équipée d'un processeur, d'une mémoire et d'un système de télétransmission (modem ou autre) gère les mesures, un stockage court, une partie des calculs et la transmission.

Une station centrale et un expert assurent le stockage à long terme, les calculs complémentaires et l'analyse des résultats/

Le choix des mesures et des traitements doit être adapté aux objectifs du télésuivi. En général, il s'agit de garantir le bon fonctionnement de l'installation et de déterminer ses performances énergétiques.

Dans ce cas, le système de télésuivi devra respecter le cahier des charges minimal suivant :

a) Paramètres mesurés (pas de temps maximal : 1 minute)

- consommation eau chaude sanitaire,
- température entrée échangeur (circuit primaire),
- température entrée ballon (circuit secondaire),
- température sortie ballon solaire (circuit distribution),
- température sortie ballon appoint (circuit distribution),
- état pompe P1,
- état pompe P2.

b) Paramètres calculés mais non stockés (pas de temps du calcul : 1 minute).

- besoins énergétiques,
- énergie solaire produite,
- énergie d'appoint,
- temps de fonctionnement de la pompe P1,
- temps de fonctionnement de la pompe P2.

Le pas de temps des mesures et calculs d'énergies doit être court en raison des variations de températures et du débit de consommation d'eau qui imposent une intégration et non un simple calcul basé sur des moyennes. Compte tenu de l'inertie thermique, un pas de temps de 1 minute est un compromis raisonnable.

c) Paramètres stockés, données détaillées (pas de temps conseillé $\Delta t = 10$ minutes)

- consommation eau chaude sanitaire (cumul sur Δt),
- temps de fonctionnement pompe P1 (cumul sur Δt),
- temps de fonctionnement pompe P2 (cumul sur Δt),
- température entrée échangeur (circuit primaire) (moyenne sur Δt),
- température entrée ballon (circuit secondaire) (moyenne sur Δt),
- température sortie ballon solaire (circuit distribution) (moyenne sur Δt),
- température sortie ballon appoint (circuit distribution) (moyenne sur Δt).

d) Paramètres stockés, données journalières (pas de temps $\Delta t = 1$ jour)

- consommation eau chaude sanitaire (cumul journalier),
- temps de fonctionnement pompe P1 (cumul journalier),
- temps de fonctionnement pompe P2 (cumul journalier),
- besoins énergétiques (cumul journalier),
- énergie solaire produite (cumul journalier),
- énergie d'appoint consommée (cumul journalier).

e) Paramètres stockés, données statistiques et cumulées à long terme (mois, an)

- consommation journalière d'eau chaude sanitaire (moyenne mensuelle),
- besoins énergétiques journaliers (moyenne mensuelle),
- énergie solaire produite par jour (moyenne mensuelle),
- taux de couverture solaire (moyenne mensuelle et annuelle),
- énergie solaire produite (cumul annuel),
- productivité annuelle du système par m² de capteur.

Les données à long terme fournissent les bilans énergétiques du système. Ces données sont calculées et stockées dans la station centrale puis diffusées régulièrement, en particulier aux utilisateurs (fréquence mensuelle, annuelle).

Les données journalières permettent de détecter les dysfonctionnements éventuels. Ces données sont transférées et analysées à intervalles réguliers (par exemple 1 semaine).

Les données détaillées permettent de visualiser le comportement de l'installation : profils de consommation et de production, fonctionnement de la régulation... et facilitent le diagnostic en cas de dysfonctionnement. Ces données sont transférées régulièrement en phase de démarrage, puis de temps à autre, en particulier dès que l'analyse détecte un dysfonctionnement.

5. Pour en savoir plus

- <http://www.ademe.fr>
- <http://www.cstb.fr>
- <http://www.tecsol.fr>
- <http://www.costic.asso.fr>
- <http://www.sigma-consultants.fr>
- <http://www.outilssolaires.com>
- <http://europa.eu.int/en/comm/dg17/programs.htm>
- <http://www.agores.org/>
- http://www.greentie.org/iea_coll.htm
- <http://www.unesco.org/science/wsp/>
- <http://www.worldbank.org/html/extdr/thematic.htm>
- <http://www.satel-light.com>
- <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- http://wrdcngo.nrel.gov/html/get_data-ap.html

6. Exemples de réalisations d'installations collectives

- Centre Héliomarin de Vallauris, France
- Centre hospitalier Castelluccio, France
- Centre Rhône-Azûr, France
- Centre d'Alt Rendiment (residencia), Espagne
- Centre de natation à Mataro, Espagne
- Cité Foucques (Crous 1), La Réunion
- Foyer Lannelongue, France
- HLM. Les Tilleuls, France
- Hôpital de Castres, France
- Hôpital Sant Miquel, Espagne
- Hôtel Hipocampo Playa, Espagne
- Hôtel Kheops, Tunisie
- Hôtel Lancaster, Espagne
- Hôtel Topacio, Espagne
- IMP de Bessenay, France
- Novotel Fleur d'Epee, Guadeloupe
- Patinoire du Lycée Climatique, France
- Piscine municipale de Montmélian, France
- Résidence Moulin des Prés, France
- Royal Playa de Palma, Espagne
- Vila Termal de Arnoia, Espagne
- Immeuble l'Hélios à Chasse sur Rhône, France
- Immeuble Les Platanes à Chambéry, France
- Immeubles Surieux à Echirrolles, France