

## **I. Introduction**

L'utilisation de l'énergie solaire constitue un défi pour les spécialistes des branches sanitaires et chauffage: une installation solaire est encore une nouveauté pour la plupart de ces professionnels. La maîtrise de ces techniques est un investissement pour le futur des entreprises. En effet, la réalisation d'installations solaires aide à maintenir des places de travail, à en créer de nouvelles et génère des bénéfices.

Dans ce chapitre nous nous intéressons au dimensionnement de la centrale solaire thermodynamique produisant de l'eau chaude et de l'électricité.

## **II. Dimensionnement des équipements solaire**

### **❖ Principe du dimensionnement**

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 couplée toujours avec 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 meilleur 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<sup>2</sup> de capteur.
- La productivité de l'installation (production par m<sup>2</sup> 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 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.

### III. Evaluation des performances d'une installation solaire

#### III.1. Evaluation de la production énergétique instantanée d'un capteur solaire

##### ❖ Equation 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. Au niveau de la normalisation internationale, on utilise plutôt la température d'entrée du fluide.

$$P_u = S (F_{\tau\alpha} I - F_{rUI} (T_{fe} - T_e)) \quad (1)$$

Avec :

$P_u$  : Puissance utile ( $W/m^2$ )

$I$  : Flux du 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 ( $^{\circ}C$ )

$S$  : Surface des capteurs ( $m^2$ )

$F_{\tau\alpha}$  : Coefficient caractéristique des gains du capteur (-)

$F_{rUI}$  : Coefficient caractéristique des pertes du capteur (-)

Avec :  $I = 2000 \text{ w}/m^2$

$$F_{\tau\alpha} = 0,7 \text{ w}/m^2/{}^{\circ}C$$

$$F_{rUI} = 5 \text{ w}/m^2/{}^{\circ}C$$

$$T_{cc} = 65^{\circ}C \quad ; \quad T_{fe} = 45^{\circ}C \quad ; \quad T_e = 25^{\circ}C \quad ; \quad S = 2m^2$$

##### Application numérique:

$$P_u = 2[0,7 \times 2000 - 5(45 - 25)]$$

$$P_u = 2600 \text{ w}$$

##### ❖ 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 ( $F_{\tau\alpha}, F_{rUI}$ ) 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.

### ❖ 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 la surface supérieure du coffre du capteur.
- La surface utile, plus petite est la surface d'entrée(Se) du rayonnement.

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 Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) donnent la surface d'entrée et la surface hors – tout .En pratique, on peut utiliser l'une ou l'autre pourvu que toute 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 les calculs de performances, on utilisera les paramètres caractéristiques des capteurs définis pour la surface de référence choisie.

### III.2. 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 solaire et de la consommation.

En effet, dans l'équation fondamentale vue plus haut, les termes  $F_{rUI}(T_{fe} - T_e)$  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.

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  $T_s$  et pas d'échangeur, on a :

$$T_{fe} = T_s - \varepsilon \tag{2}$$

$\varepsilon$  : représente le refroidissement du fluide dans le circuit entre stock et capteur.

$T_{fe}$  Varie en permanence car  $T_s$  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  $P_u$  à l'instant  $t$  qui dépend donc :

- Des caractéristiques des capteurs,
- Des autres paramètres du système : schéma, échangeur, stock, régulation,
- Du profil des apports solaire,
- Du profil de puisage,

### **III.3 Conséquence sur la définition et l'évaluation du système**

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

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

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

- Un taux de couverture solaire  $C_s$  élevé,
- Un rendement élevé.

Car en augmentant  $C_s$ , on favorise les sources principales de perte thermique :

- Les surplus temporaire de production,
- Les pics de température dans les capteurs,

## **IV. Outils de calcul des performances d'un système solaire ECS**

### **IV.1. Familles d'outils**

Tous les outils de calcul des performances des installations solaire- eau chaude sanitaire 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 permettent une compréhension fine du comportement du système. Ils reposent sur des modèles physiques précis : on connaît la température en sortie du capteur le 13 juillet à 13h30. Le pas de temps du calcul varie de 1 min 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 pas le cas aujourd'hui puisqu'une année de simulation nécessite que quelque seconde de calculs 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 successif du système) représente 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.

## **IV.2. Un outil simplifié : SOLO**

SOLO est une méthode de calcul développée par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Différents outils informatiques reposent sur cette méthode (logiciel pour micro-ordinateur, serveur minitel, site internet). Ces outils utilisent la même méthodologie de calcul à quelque différence minime près.

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'équation semi-empirique qui en été établies en traitant des cas-type 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-type, en général),
  - Capteur : surface totale  $S$ , paramètre  $F_{\tau\alpha}$ ,  $F_{rUT}$ ,
  - Stock : volume  $V$ , constante de refroidissement  $C_R$ , intérieur ou extérieur,
  - Circuit primaire (coefficient de pertes  $K_t$ ) et échangeur (coefficient d'échange  $K_{éch}$ ),
  - Note : plusieurs outils prédéfinissent les valeurs de  $K_t$  et  $K_{éch}$ .
- d) On en déduit les bilans énergétiques journaliers, mensuels et annuel SOLO (Voir Figure 13) 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.

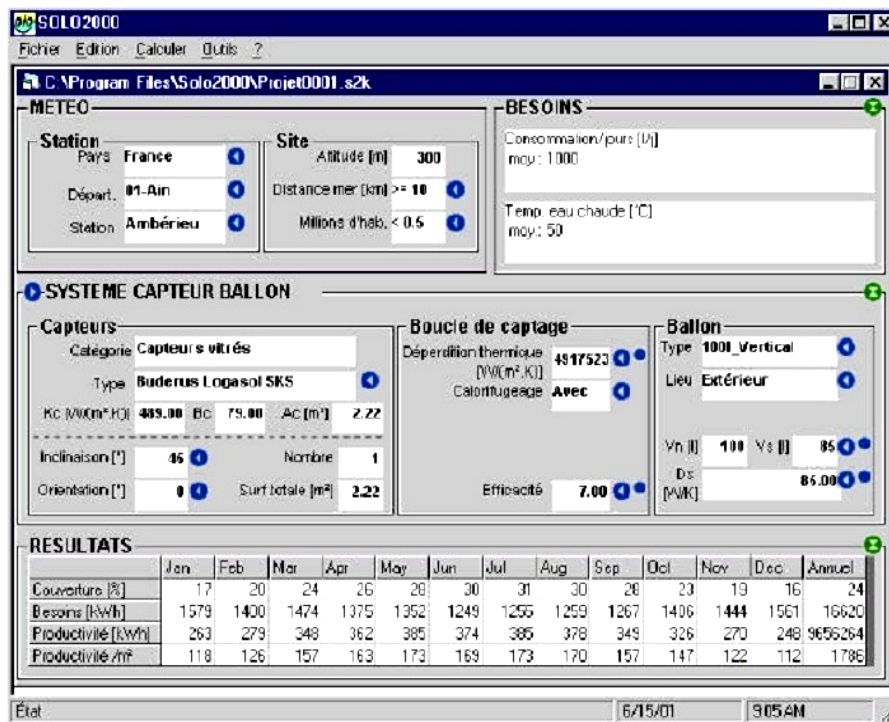


Figure 13: Interface graphique du Logiciel SOLO

## V. 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 : Pré-dimensionnement 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 de dimensionnement de l'ensemble des composants.

### V.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) se 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 prés-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 certaine période,
- ne pas dépasser un investissement maximal,

D'autres contraintes peuvent résulter de considération pratique sur le site :

- La surface maximale disponible pour l'implantation des capteurs,
- Le choix d'orientation et d'inclinaison limités pour les capteurs, ombrage,
- 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)

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.



✓ **Température d'eau froide**

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 :

$$T_{ef}(i) = (T_e(i) + T_{em}) / 2 \tag{3}$$

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

**Application numérique**

- **Pour les mois de l'hiver**

$$T_{ef}(i) = (7 + 25) / 2$$

$$T_{ef}(i) = 16\text{°C}$$

- **Pour les mois de l'été**

$$T_{ef}(i) = (30 + 25) / 2$$

$$T_{ef}(i) = 27,5\text{°C}$$

✓ **Rayonnement global horizontal journalier**

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 :

$$R_{GJ}(i) = R_{jE}(i) \times (0,19 + 0,62.HI(i)/D_j(i)) \tag{4}$$

Où :

$R_{jE}(i)$  : Rayonnement journalier extraterrestre sur le site pour le mois  $i$  ;

$H_i(i)$  : Nombre d'heures moyen d'ensoleillement journalier pour le mois  $i$  ;

$D_j(i)$  : Durée moyenne du jour sur le site pour le mois  $i$  ;

$R_{jE}(i)$  et  $D_j(i)$  ne dépendent que de latitude et du mois. Ils sont calculables par des équations astronomiques simples ou peuvent être trouvés dans des tables.

• **Pour les mois de l'hiver**

$$H_I(i) = 8\text{h}$$

$$R_{JE}(i) = 1000 \text{ w/m}^2$$

$$D_J(i) = 12\text{h}$$

**Application numérique**

$$R_{GJ}(i) = 1000 \times (0,19 + 0,62.8/12)$$

$$R_{GJ}(i) = \mathbf{396,66W/m}^2$$

• **Pour les mois de l'été**

$$H_I(i) = 12\text{h}$$

**Application numérique**

$$R_{GJ}(i) = 1000 \times (0,19 + 0,62.12/12)$$

$$R_{GJ}(i) = \mathbf{810 W/m}^2$$

➤ **Données nécessaires sur les caractéristiques des composants(SOLO)**

Ce sont :

- la surface unitaire et coefficients  $F_{rUI}$ ,  $F_{\tau\alpha}$  des capteurs solaires,
- Le volume et la constante de refroidissement  $C_R$  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 :

$$C_R = \frac{24}{V_b} \left( 1,1 + \frac{0,05}{V_b} \right) \times h \times S_b \tag{5}$$

Avec :

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{10} + \frac{e_{iso}}{k_{iso}} \tag{6}$$

Avec :

$V_b$  : Volume du ballon ( $\text{m}^3$ ),

$S_b$  : Surface extérieure du ballon ( $\text{m}^2$ ),

$e_{iso}$  : Épaisseur de l'isolant (m),

$k_{iso}$  : Conductivité de l'isolant ( $\text{W/m/K}$ ),

**Application numérique**

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{10} + \frac{0,01}{0,44} = 0,12 \Rightarrow h = 8,3 \text{WK}/m^2$$

$$C_R = \frac{24}{2000} \left( 1,1 + \frac{0,05}{2000} \right) \times 8,3 \times 10 = 1,09$$

➤ **Données économiques**

Les données économiques sont :

- Le cout d'investissement  $I$  en fonction de la surface  $S_c$  et du volume  $V_s$
- Le prix de l'énergie d'appoint (en valeur mensuelle ou annuelle)

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

$$I = I_0 + a.S_c + b.V_s \tag{7}$$

( $a$  et  $b$  sont deux coefficients à déterminer)

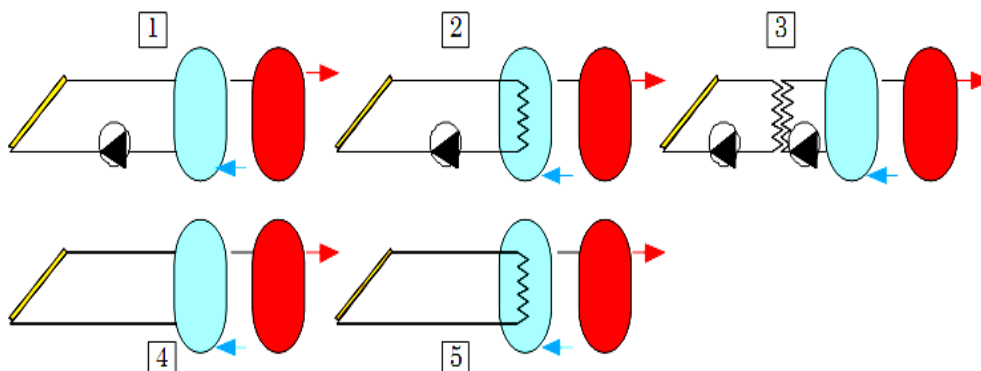
**V.2. Définition des principes de l'installation**

❖ **Choix du schéma de principe de l'installation**

Ce choix doit se faire parmi les 5 schémas simple reconnu par SOLO. L'éventail est suffisant car les schémas plus complexes sont rarement plus efficaces en pratique en raison de problèmes de régulation et de fiabilité. Tous ces schémas comportent un appoint en séries 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.



**Figure14 :** 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 (Voir Tableau 1) sont utilisés dans les installations collectives .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 deux schémas comportent les composants suivants à définir et dimensionner :

<b>Schéma 2</b>	<b>Schéma 3</b>
Echangeur interne	Echangeur externe
Capteurs	Capteurs
Tuyauteries primaire	Tuyauteries primaire
Pompe primaire	Pompe primaire
Ballon solaire	Echangeur externe
Appoint de distribution	Tuyauteries secondaire
	Pompe secondaire
	Ballon solaire
	Appoint de distribution

**Tableau 1** : *Principe d'installation des schémas 2 et 3 reconnus par SOLO*

Le choix se fait en fonction de la taille de l'installation. En dessous de 20m<sup>2</sup> de capteur, on utilise plutôt le schéma2 et au-dessus plutôt le schéma 3.

### **V.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 se traduira généralement par une perte de temps.

#### **❖ Capteur**

Pour une application de production d'eau chaude sanitaire, on utilisera 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.
- Besoin d'eau chaude à haute température et taux de couverture élevé.

### ❖ **Echangeur**

Les échangeurs externes seront des échangeurs à plaques. Les échangeurs intégrés seront du type de serpentin.

### ❖ **Ballons de stockage**

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

## **VI. 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.

### **VI.1. Problématique du pré-dimensionnement**

Sur la base du principe (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 centrale ( $S_{co}$ ,  $V_{so}$ ). Sauf exception, on est certain que les valeurs optimales comprises dans les intervalles [ $S_{co}-50\%$ ,  $S_{co}+50\%$ ], [ $V_{so}-50\%$ ,  $V_{so}+50\%$ ] dans tous les cas.

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.

### **VI.2. Pré-dimensionnement des capteurs solaires**

#### ✓ *Valeur centrale*

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

#### ✓ *Application des contraintes*

**Contrainte 1** : cout d'investissement maximal autorisé  $I_{max}$

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

$$I = I_0 + a \cdot S_c + b \cdot V_s$$

Dans laquelle  $S_c$  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.

**Contrainte 2 :** Surface disponible pour les capteurs  $S_{dispo}$ .

On peut définir la surface maximale d'un champ de N rangées de capteurs inclinées d'un angle  $\beta$  sur l'horizontale en fonction de  $S_{dispo}$  par :

$$S_c Max = S_{dispo} / (R_s - tg(B)/N) \quad (8)$$

Avec :

$$R_s = 2 \cos(|\beta - 60^\circ|) \quad (9)$$

L'écart minimal C entre rangées est donné par :

$$\Delta C = \sqrt{3} \cdot \sin(B) \quad (10)$$

Inclinaison sur l'horizontale (°)	0	15	30	45	60	75	90
Ratio $R_s$	1,00	1,41	1,73	1,93	2,00	1,93	1,73
Ecart entre capteur de longueur L	0	0,45L	0,87L	1,22L	1,5L	1,67L	1,73L

**Tableau 2 :** *Donnés sur les capteurs*

**Application numérique**

$$R_s = 2 \cos(|45^\circ - 60^\circ|) = 2 \cos(15^\circ) = 1.93$$

$$S_c Max = 251.6 / (1,93 - tg(45)/3) = 157.25m^2$$

On a pour 100 l/j en choisit un capteur de surface entre 1 et 2m<sup>2</sup>

$$100 \text{ l/j} \rightarrow 1,5m^2 \quad \rightarrow S_{dispo} = 251,6m^2$$

$$16773 \text{ l/j} \rightarrow S_{dispo}$$

✓ **Choix de l'inclinaison**

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

- Latitude,
- 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 : 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°) 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,

### **VI.3. Pré-dimensionnement du stock**

✓ ***Valeur centrale***

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

$$V_{so} = \max(V_{ja}, V_{jété}) \tag{11}$$

Avec :

$V_{ja}$  : Consommation moyenne journalière sur la période de fonctionnement,

$V_{jété}$  : 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,

✓ ***Applications des contraintes***

Des restrictions liées à la taille du local devant recevoir les ballons, peuvent conduire à réduire le volume  $V_s$  Max 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 :

$$20 \sqrt{\frac{V_s}{S_c}} < 300 \tag{12}$$

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,

#### **VI.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 ( $k_{t1}$  en  $W/C^\circ/m^2$ ), 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 ( $K_{éch1}$  en  $W/C^\circ/m^2$ ), 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 :  $K_{t1} = 1W/^\circ C.m^2$

- Échangeur :  $K_{éch1} = 50W/C^\circ/m^2$ ,

Il convient de noter qu'il s'agit là de caractéristiques théoriques minimales, En pratique, on choisira toujours un échangeur vérifiant :

$$K_{éch1} \geq 100W / C^\circ / m^2 \tag{13}$$

➤ **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,



## **VI.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  $S_c$  et le volume du stock  $V_s$  restent les paramètres essentiels du dimensionnement, Ils ne peuvent plus être considérés indépendants, On devra donc tester différents couples  $(S_c, V_s)$  et comparer les résultats obtenus sur la base des critères et des contraintes du projet, Le pré-dimensionnement a donné un couple central  $(S_{c0}, V_{s0})$  et des valeurs extrêmes  $(S_{c\ min}, S_{c\ max})$  et  $(V_{s\ min}, V_{s\ max})$ ,

On pourra utilement tester les couples suivants :  $(S_{c0}, V_{s0})$ ,  $(S_{c0}, V_{s\ min})$ ,  $(S_{c0}, V_{s\ max})$ ,

$(S_{c\ min}, V_{s0})$ ,  $(S_{c\ max}, V_{s0})$  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,

### **VI.5.1. 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 :

- $V_j$  : Consommation journalière (données des besoins)
- $S_c$  : Surface de capteurs
- $R$  : Rendement moyen du système
- $C_s$  : Taux de couverture solaire

De ces 4 caractéristiques, on peut tirer deux ratios simples qui caractérisent le dimensionnement de l'installation :

$$\frac{V_j}{S_c} \text{ et } \frac{R}{C_s} \tag{14}$$

Le pré-dimensionnement fixe la valeur du premier ratio  $\frac{V_j}{S_c}$  ( $75l/m^2$ ) mais il peut être montré

que ceci revient aussi à fixer la valeur du deuxième ratio  $\frac{R}{C_s}$  pour le problème posé,

En effet :

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

- $I_1$  : Irradiation solaire annuelle par  $m^2$  sur le plan des capteurs (kWh/ $m^2$ /an)
- $I_{j1}$  : Irradiation solaire moyenne journalière par  $m^2$  (kWh/ $m^2$ /j),

On a :

- $I_1 = 365.I_{j1}$
- $V_j$  : Consommation journalière d'eau chaude (litres/j)
- $\Delta T$  : Echauffement moyen de l'eau :

$$T_{ec} - T_{ef} = T_{ec} - T_e (C^\circ) \quad (15)$$

- $T_{ec}$  : Température de consigne d'eau chaude ( $^\circ C$ ),
- $T_{ef}$  : Température moyenne d'eau froide, supposée égale à  $T_e$  ( $^\circ C$ ),
- $T_e$  : 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 Wh/litre/ $^\circ C$  :

$$B_j = C_p \cdot V_j \Delta T = 1.16.V_j \Delta T / 1000 \quad (16)$$

$$B = 365 B_j = 0.423.V_j \Delta T \quad (17)$$

La production solaire annuelle  $E$  (kWh/an) et la productivité annuelle  $E_1$  (kWh/ $m^2$ /an) du système s'écrivent :

$$E = C_s \cdot B = S_c \cdot R \cdot I_1 \quad E_1 = R \cdot I_1 = B \cdot C_s / S_c \quad (18)$$

La production solaire moyenne journalière  $E_j$  (kWh/j) et la productivité moyenne journalière  $E_{1j}$  (kWh/ $m^2$ /j) s'écrivent :

$$E_j = C_s \cdot B_j = S_c \cdot R \cdot I_{1j} \quad E_{1j} = R \cdot I_{1j} = B_j \cdot C_s / S_c \quad (19)$$

On en déduit :

$$R/C_s = (B_j / I_{1j}) / S_c \quad (20)$$

Ou encore :

$$R/C_s = (1,16.V_j \cdot \Delta T / I_{1j}) / S_c / 1000 \quad \text{On constate que } R/C_s \text{ et } V_j/S_c \text{ sont proportionnels de}$$

rapport  $k$  :

$$K = (R/C_s) / (V_j/S_c) = (1,16 \cdot \Delta T) / I_{1j} / 1000 \quad (21)$$

De la même manière, les ratios  $E_1/C_s$  et  $V_j/S_c$  proportionnels de rapport  $K'$  :

$$K' = (E_{1j}/C_s)/(V_j/S_c) = 1,16.\Delta T/1000 \quad (22)$$

Et les ratios  $E_1 / C_s$  et  $V_j / S_c$  sont proportionnels de rapport  $k''$  :

$$K'' = (E_1/C_s)/(V_j/S_c) = 0,423.\Delta T \quad (23)$$

Car :

$$E_1 = 365E_{1j} \quad (24)$$

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  $E_1$  et  $E_{1j}$ . Le coefficient  $k$  ne dépend que de  $\Delta T$  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 Tlemcen on a, en valeurs arrondies :

$$I_1 = 365.I_{j1} = 365.R_G = 365 \times 396,66 = 144,8 \text{ KWh} / J$$

$$T_c = 25^\circ\text{C}$$

$$T_{ec} = 65^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 40^\circ\text{C}$$

$$K = (1,16.\Delta T)/I_{1j}/1000 = (1,16 \times 40)/396,66/1000 = 1,16.10^{-4}$$

$$K' = 1,16.\Delta T/1000 = 1,16 \times 40/1000 = 0,046$$

$$K'' = 0,423.\Delta T = 0,423 \times 40 = 16,9$$

Le ratio de  $V_j/S_c$  de  $75 \text{ l/m}^2$  correspond ici à un ratio  $R/C_s = 75/137$ , soit 0,55.

Cette proportionnalité entre les ratios  $\frac{R}{C_s}$ ,  $\frac{E_{j1}}{C_s}$  et  $\frac{V_j}{S_c}$  montre que choisir un ratio de

dimensionnement  $\frac{V_j}{S_c}$  déterminé, revient en fait à imposer une valeur particulière aux ratios de

performances  $\frac{R}{C_s}$  et  $\frac{E_{j1}}{C_s}$ ,

En particulier :

- Si on diminue le ratio  $\frac{V_j}{S_c}$ , on augmente le taux de couverture solaire, mais parallèlement le rendement diminue, le ratio  $\frac{R}{C_s}$  diminue donc (plus vite que le taux de couverture solaire),
- Si on augmente le ratio  $\frac{V_j}{S_c}$ , on diminue le taux de couverture solaire, mais parallèlement le rendement augmente, le ratio  $\frac{R}{C_s}$  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,  $C_s$  et  $R$  n'étant pas indépendants, il y a un et un seul couple  $(C_s ; R)$  permettant d'atteindre un ratio  $R/C_s$  donné,

## **VI.5.2. 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,

❖ **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,

## VII. 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 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  $F_{\tau\alpha} = 0,7$  ;  $F_{rUI} = 5 \text{ W/m}^2/\text{°C}$ ,
- pertes des circuits primaires et secondaires négligeables,
- puissance incidente :  $I = 2000 \text{ W/m}^2$  et température extérieure  $T_e = 25\text{°C}$ ,
- température d'entrée du fluide dans les capteurs :  $T_{fe} = 45\text{°C}$ ,
- échangeur : coefficient d'échange unitaire  $K_{\text{éch1}} = 100 \text{ W/°C}$  par  $\text{m}^2$  de capteur

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

(Voir figure 15)

$$P_{ua} = S(F_{\tau\alpha} I - F_{rUI} (T_{fea} - T_e)) = 2[0,7 \times 2000 - 5(45 - 25)] = 2600W / m^2$$

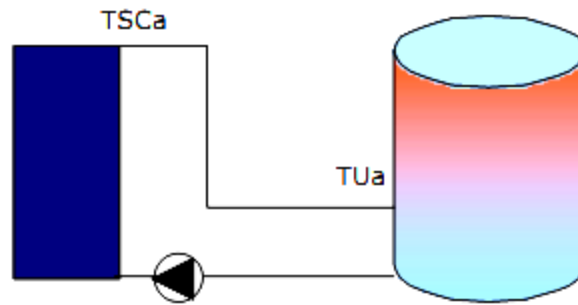


Figure15 : Installation sans échangeur

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

(Voir figure 16)

Le transfert de la puissance utile à travers l'échangeur nécessite une différence de température entre l'entrée côté primaire et la sortie côté secondaire,

$$\Delta T_{éch} = T_{EE1} - T_{SE2a} \quad (25)$$

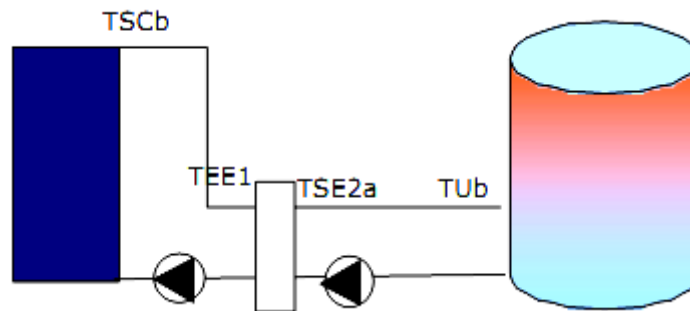


Figure16 : Installation avec échangeur

Les pertes du primaire étant négligeables, on a :

$$T_{SCb} - T_{Ub} = T_{SCb} - T_{SE2} = T_{EE1} - T_{SE2} = \Delta T_{éch} = P_u / K_{éch1} = 2600/100 = 26C^\circ \quad (26)$$

Pour avoir la même température d'entrée du stock :  $T_{Ub} = T_{Ua}$ , on doit avoir :

$$T_{SCb} - T_{SCa} = T_{SCb} - T_{Ua} = T_{SCb} - T_{Ub} = 26C^\circ \quad (27)$$

En première approximation :

$$T_{feb} - T_{fea} = T_{scb} - T_{sca} - T_{sca} \quad (28)$$

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

$F_{rUI}$  du capteur

$$P_{ub} = S(F_{\alpha\alpha} I - F_{rUI} (T_{fe} - T_e)) = 2[0,7 \times 2000 - 5(45 + 26 - 25)] = 2340W / m^2$$

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

La perte de rendement  $\Delta r$  par beau temps peut être évaluée, en première approximation, à

$$\Delta r = F_{rUI} / K_{éch1} \tag{29}$$

(Dans notre cas,  $\Delta r = 5/100 = 5\%$ )

$\Delta r$  vaut environ 3% si  $K_{éch1} = 150W/m^2/^\circ C$  mais 10% si  $K_{éch1} = 50W/m^2/^\circ C$ , C'est la valeur choisie pour les calculs de SOLO. En pratique, on ne descendra pas en-dessous de

100 W/m<sup>2</sup>/°C, ce qui limite la perte de rendement à 5% si  $F_{rUI}$  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 W/m<sup>2</sup>/°C,

## **VIII. 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,

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 élevé,

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 :

$$P = (K.Q.H.r.g) / R \tag{30}$$

Dans laquelle :

- Q est le débit en (m<sup>3</sup>/s),
- H : 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,
- r : Masse volumique du fluide caloporteur en (kg/m<sup>3</sup>),
- g : Accélération de la pesanteur en (m/s<sup>2</sup>),
- R : 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 m<sup>2</sup> 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  $\lambda = 0,04 \text{ W /m}^2\text{C}^\circ$ , dont l'épaisseur sans finition est indiquée dans le tableau suivant :



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

Tableau 3 : Epaisseur de l'isolant à différents diamètres

## IX. Définition de Tlemcen

Est une commune de la wilaya de Tlemcen, dont elle est le chef-lieu. Elle est située au nord-ouest de l'Algérie, à 520 km au sud-ouest d'Alger, à 140 km au sud-ouest d'Oran et, frontalière du Maroc, à 76 km à l'est de la ville marocaine d'Oujda. Tlemcen, érigée dans l'arrière-pays, est distante de 40 km de la mer Méditerranée.

Ancienne capitale du Maghreb central, la ville mêle influences berbères, arabes, hispano-mauresques et françaises. De cette mosaïque d'influences, Tlemcen tire le titre de capitale de l'art arabo-mauresque en Algérie. Selon Dominique Mataillet, divers titres sont attribués à la ville dont « Perle du Maghreb », « Grenade africaine » et « Médine de l'Occident ».

## Conclusion

L'amélioration de la compétitivité des CST à concentration passe par un travail sur le coût et la valeur du kWh. Le coût du kWh est proportionnel au montant de l'investissement initial divisé par la production électrique. Pour baisser ce coût, il faut donc soit réduire l'investissement, soit augmenter la quantité d'énergie générée.