

Algorithmes et calculs énergétiques



Sommaire

Sommaire	1
Nomenclature	2
Introduction	4
1. Calcul de l'irradiation globale sur un plan incliné et selon une orientation précise.....	5
a. Constante solaire et Irradiation extraterrestre	5
b. Indice de clarté	6
c. Rapport IDH/IGH ou K_d	6
d. Composantes sur plan horizontal.....	6
e. Composantes selon l'inclinaison du capteur et son orientation	7
f. Calculs de IDP et IRP.....	7
g. Calcul de IBP	7
2. Dimensionnement des panneaux solaires thermiques.....	9
a. Besoin en ECS.....	9
b. Besoin en chauffage.....	10
c. Choix de la méthode pour dimensionner nos panneaux solaires	10
d. Méthode F-chart	11
e. Taux annuel de couverture	17
f. Apport solaire	18
g. Production annuelle.....	18
h. Rendement	18

Nomenclature

A_{solaire}	: Apport solaire, [KWh]
$a1$: Coefficient linéaire de transfert thermique, [W/m ² . K]
$a2$: Coefficient quadratique de transfert thermique, [W/m ² . K ²]
B_{CHJ}	: Besoin en chauffage journalier, [Wh/jour]
B_{CHM}	: Besoin en chauffage mensuel, [KWh/mois]
B_{ECSJ}	: Besoin en ECS journalier, [J/jour]
B_{ECSM}	: Besoin en ECS mensuel, [J/mois]
B_{tot}	: Besoin mensuel total (ECS + Chauffage), [J/mois]
C^*	: Constante solaire sur l'année, déterminé grâce à la loi de Stefan-Boltzmann, $C^* = 1367$ W/m ²
C_p	: Chaleur massique [J/kg.°C]
DJU	: Nombre de Degrés Jours Unifiés [sans dimension]
f	: taux de couverture, [sans dimension]
G	: Coefficient de déperditions volumiques [W/m ³ .K]
$I_{0(n)}$: Constante solaire au jour n , [W/m ²]
IBH	: Irradiation directe horizontale, [KWh/m ² /jour]
IBP	: Irradiation directe dans le plan du capteur, [KWh/m ² /jour]
IDH	: Irradiation diffuse horizontale, [KWh/m ² /jour]
IDP	: Irradiation diffuse dans le plan du capteur, [KWh/m ² /jour]
IGH	: Irradiation globale horizontale, [KWh/m ² /jour]
IGO	: Irradiation solaire extra-terrestre, [KWh/m ² /jour]
IGP	: Irradiation globale dans le plan du capteur, [KWh/m ² /jour]
IRP	: Irradiation réfléchiée dans le plan du capteur, [KWh/m ² /jour]
$K1$: Facteur d'angle longitudinal à 50°
$K2$: Facteur d'angle transversal à 50°
Kd	: Rapport IGH/IDH, [sans dimension]
Kt	: Indice de clarté, [sans dimension]
n	: nombre de jours écoulés depuis le 1 ^{er} janvier (ex : 15 mars 2016, $n = 75$)
N	: nombre de jours dans un mois
R_b	: Facteur de transposition, [sans dimension]
S_c	: Surface des capteurs solaires, [m ²]
T_{CH}	: Température en eau chaude souhaitée, [°C]
T_{EAU}	: Température de l'eau du réseau, [°C]
T_{EXT}	: Température extérieure moyenne pour un mois, [°C]
T_{ref}	: Température de référence = 100°C
U_L	: Coefficient global de pertes thermiques [W/m ² .K]
$(UA)_h$: Coefficient de pertes global [W/°C]
V	: Volume à chauffer (de la maison), [m ³]
V_L	: Volume d'eau consommée par jour ou Volume du ballon d'eau chaude, [L]
X	: Ratio des pertes du collecteur par rapport à la charge, utilisé pour la F-chart, [sans dimension]
Y	: Ratio du rayonnement absorbé par rapport à la charge, utilisé pour la F-chart, [sans dimension]
X_c	: valeur de X corrigée, [sans dimension]
Y_c	: valeur de Y corrigée, [sans dimension]
X'	: valeur finale de X , [sans dimension]
Y'	: valeur finale Y , [sans dimension]

Lettres grecques :

β	: Inclinaison, [radians]
δ	: Déclinaison, [radians]
e_L	: Efficacité de l'échangeur (radiateur, plancher chauffant...)
Δt	: nombre de secondes dans un mois, [sans dimension]
φ	: Latitude, [radians]
η	: rendement de l'installation
η_0	: rendement optique
γ	: Orientation, [radians]
ρ	: Albédo, [sans dimension] , compris entre 0 et 1
μ	: Masse volumique de l'eau = 1 kg/L
ω_s	: Angle horaire, [radians]
ω_{sr}	: Angle horaire de lever de soleil (Sun Rise), [radians]
ω_{ss}	: Angle horaire de coucher de soleil (Sun Set), [radians]

Remarque : Tous les angles ont été mis en radians car c'est l'unité de base de PHP.

1 KWh = $3,6 * 10^6$ Joules

1 Joules = $2,7777778 * 10^{-7}$ KWh

Introduction

Pour la réalisation du logiciel CIESST, nous avons mis en place un certain nombre d'algorithmes. Ces algorithmes peuvent être divisés en deux grandes parties :

- Le calcul de l'irradiation globale sur un plan incliné et selon une orientation précise. L'irradiation globale est à calculer pour tout projet concernant l'énergie solaire, aussi bien le solaire thermique que le photovoltaïque.
- Le calcul du dimensionnement des panneaux solaires thermiques à partir du taux de couverture des besoins thermiques qui est lui-même déterminé en fonction de l'irradiation globale sur plan incliné et des différents besoins de l'utilisateur (en ECS et/ou en chauffage).

Sur plusieurs points, il existe différentes méthodes de calculs. Les méthodes choisies ont été dictées par rapport aux données auxquelles nous avons accès et selon la justesse des algorithmes trouvés dans les différentes bibliographies. Nous vous indiquerons quelques points dans lesquels d'autres méthodes peuvent être appliquées.

Enfin, nous avons réalisé notre code de façon à ce que les algorithmes puissent être modifiés facilement par toute personne tierce afin de ne pas « figer » notre projet. Nous proposons une certaine approche, sans affirmer que c'est la seule approche possible.

Pour pouvoir avancer dans nos algorithmes, nous avons besoin d'avoir quelques données que nous ne pouvions pas calculer ou obtenir légalement. MétéoFrance, via une convention signée, nous a fourni ces données pour une centaine de stations, nous permettant de bien quadriller la France métropolitaine (Corse y compris). Les informations étaient quotidiennes et données sur 10 ans, nous avons choisi de garder la moyenne au 15 de chaque mois. Pour chaque station, nous avons eu :

- Les coordonnées GPS (longitude et latitude)
- L'altitude
- Les températures extérieures moyennes quotidiennes
- L'irradiation globale selon un plan horizontal (en $\text{J}/\text{cm}^2/\text{jour}$)

1. Calcul de l'irradiation globale sur un plan incliné et selon une orientation précise

a. Constante solaire et Irradiation extraterrestre

On détermine la Constante solaire I_0 le 15 de chaque mois à partir de la Constante solaire sur l'année C^* . Cette constante est l'irradiance issue du soleil. Elle est dans le plan perpendiculaire aux rayons du soleil. La variation de cette valeur est fonction de la distance terre soleil provenant de l'excentricité de l'orbite de la terre, elle dépend donc du jour de l'année. Elle est la même en tout point de la France.

$$I_{0(n)}(W/m^2) = C^* * [1 + 0,033 * \cos\left(\frac{n - 4}{365} * 360\right)]$$

Une méthode utilisant le développement de série de Fourier est également possible, le résultat étant rigoureusement proche.

$$I_{0(n)}(W/m^2) = C^* + 45,326 * \cos(d) + 0,88018 * \cos(2d) - 0,00461 * \cos(3d) + 1,8037 * \sin(d) + 0,09746 * \sin(2d) + 0,18412 * \sin(3d)$$

$$\text{avec } d = \frac{360}{365} * n$$

A partir de cette constante solaire, on va pouvoir déterminer l'irradiation solaire extra-terrestre IGO . C'est l'énergie lumineuse reçue du soleil à la surface de la terre sans atmosphère, durant une journée. Cette valeur est calculée en fonction de la constante solaire, de la latitude du lieu considéré et de la date choisie.

Pour un jour n :

$$IGO (Wh/m^2) = \frac{24}{\pi} * I_{0(n)} * (\cos(\varphi) * \cos(\delta) * \sin(\omega_s) + \omega_s * \sin(\varphi) * \sin(\delta))$$

$$\delta = 23,45 * \sin\left(\frac{360 * (284 + n)}{365}\right) \text{ (en } ^\circ, \text{ à mettre en radians)}$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan(\varphi) * \tan(\delta)) \text{ (en radians)}$$

Remarque : L'angle horaire correspond au déplacement du soleil vers l'est ou l'ouest par rapport au méridien local dû à la rotation de la terre à 15° par heure sur son axe. Il dépend donc de la latitude mais aussi de la déclinaison.

b. Indice de clarté

L'indice de clarté est le rapport entre l'Irradiation Globale Horizontale (IGH) et l'Irradiation solaire extra-terrestre (IGO).

$$K_t = \frac{IGH}{IGO}$$

Rappel : Les IGH sont connus grâce aux bases de données fournies par MétéoFrance.

c. Rapport IDH/IGH ou K_d

A partir de l'indice de clarté K_t on pourra déterminer **l'irradiation diffuse Horizontale**, notée IDH . Il faut tout d'abord avoir K_d . Pour cela, il existe de nombreuses méthodes (Orgill, Liu et Jordan, Erbs, Variante, Page, Iqbal...), cependant chacune donne des résultats plus ou moins proches l'un de l'autre. Finalement nous avons choisi un modèle linéaire simple.

$$K_d = 1,0988 - 1,1988.K_t$$

Remarque : La corrélation d'Orgill et Hollands donne :

$$K_d = \begin{cases} 1 - 0,249.K_t & \text{si } K_t < 0,35 \\ 1,557 - 1,84.K_t & \text{si } 0,35 < K_t < 0,75 \\ 0,177 & \text{si } K_t > 0,75 \end{cases}$$

d. Composantes sur plan horizontal

A partir de K_d et IGH , nous pouvons donc déterminer l'Irradiation Diffuse Horizontale (IDH) pour chaque mois. On a alors :

$$IDH = K_d * IGH$$

On a finalement IBH : Irradiation Directe Horizontale. La somme du directe et du diffus est égale au global (SEULEMENT VRAI DANS LE PLAN). Donc :

$$IBH = IGH - IDH$$

L'Irradiation Global Horizontale IGH correspond à l'énergie lumineuse réelle reçue du soleil à la surface de la terre, durant une journée en tenant compte des phénomènes météorologiques.

L'Irradiation Diffuse Horizontale IDH est l'énergie lumineuse provenant de la voûte céleste en excluant le rayonnement direct du soleil sur un plan horizontal

L'Irradiation Directe Horizontale *IBH* est la composante directe (beam pour direct en anglais) de l'énergie lumineuse provenant des rayons du soleil sur un plan horizontal.

e. Composantes selon l'inclinaison du capteur et son orientation

Selon une inclinaison (β) et une orientation (γ), l'irradiation globale sur le plan incliné (*IGP*) fait apparaître une nouvelle composante, l'irradiation réfléchie (*IRP*) : cette réflexion fait apparaître un nouveau facteur, l'albédo ρ , qui représente un facteur de réflexion selon l'environnement extérieur (neige, ville, forêt...).

On a alors :

$$IGP = IDP + IBP + IRP$$

On peut déterminer *IGP* à partir des composantes horizontales calculées précédemment :

$$IGP = R_b \times IBH + IDH \times \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \cdot IGH \times \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

f. Calculs de IDP et IRP

Pour ces deux composantes, le calcul est relativement simple car il ne prend en compte que l'inclinaison du capteur. On a donc :

$$IDP = IDH \times \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right)$$

$$IRP = \rho \cdot IGH \times \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

g. Calcul de IBP

Le calcul de la composante directe est plus complexe avec l'arrivée du facteur de transposition R_b , il prend en compte l'orientation du capteur par rapport au sud (compté positivement vers l'ouest et négativement vers l'est).

Pour calculer le facteur de transposition R_b , nous avons besoin d'avoir les angles horaires ω_s, ω_{ss} et ω_{sr} :

ω_{ss} et ω_{sr} sont définis tels quels :

si $\gamma > 0^\circ$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{sr} = -\min\left(\omega_s, \cos^{-1}\left(\frac{AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1}\right)\right) \\ \omega_{ss} = \min\left(\omega_s, \cos^{-1}\left(\frac{AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1}\right)\right) \end{array} \right.$$

si $\gamma < 0^\circ$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{sr} = -\min(\omega_s, \cos^{-1}\left(\frac{AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1}\right)) \\ \omega_{ss} = \min(\omega_s, \cos^{-1}\left(\frac{AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1}\right)) \end{array} \right.$$

Avec

$$A = \frac{\cos \varphi}{\sin \gamma * \tan \beta} + \frac{\sin \varphi}{\tan \gamma}$$

$$B = \tan \delta * \left(\frac{\cos \varphi}{\tan \gamma} - \frac{\sin \varphi}{\sin \gamma * \tan \beta} \right)$$

Attention :

Pour le cas où l'orientation est nulle, nous prenons un cas limite $\gamma = 10^{-6}^\circ$
 Pour le cas où l'inclinaison est nulle, nous renvoyons au cas horizontal ($IRP=0$)

A partir de ces données, on peut alors déterminer le facteur de transposition R_b :

$$R_b = \frac{[(\cos \beta \sin \delta \sin \phi)(\omega_{ss} - \omega_{sr}) - (\sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma)(\omega_{ss} - \omega_{sr}) + (\cos \phi \cos \delta \cos \beta)(\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr}) + (\cos \delta \cos \gamma \sin \phi \sin \beta)(\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr}) - (\cos \delta \sin \beta \sin \gamma)(\cos \omega_{ss} - \cos \omega_{sr})]}{2(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \phi \sin \delta)}$$

Ainsi on a :

$$IBP = R_b * IBH$$

On rappelle que l'on a :

$$IGP = R_b \times IBH + IDH \times \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \cdot IGH \times \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

Remarque :

Pour calculer la composante directe IBP, il existe des méthodes qui ne passent pas par le facteur de transposition. Par exemple, le logiciel Calsol® a déterminé IBP à partir des données de IGH au pas de 5 min et en prenant en compte à tout instant de la journée l'azimut et la hauteur du soleil.

2. Dimensionnement des panneaux solaires thermiques

a. Besoin en ECS

Les besoins en ECS quotidiens sont :

$$B_{ECSJ}(J/jour) = C_p * \mu * V_L * (T_{ch} - T_{eau})$$

Avec :













- V_L : le volume du ballon d'eau chaude ou si la valeur est non connue la consommation en ECS journalière suivant le principe suivant :
 - o Si le chauffage est électrique : nb de personnes * 75 (L)
 - o Sinon : nb de personnes * 200 (L)
- T_{ch} : la température en eau chaude souhaitée
- T_{eau} : la température du réseau déterminé de manière empirique comme étant la température au sol. Pour chaque mois :

$$T_{eau} = \frac{T_{ext}(mois) + T_{ext}(moyenne \text{ à l'année})}{2}$$

Remarque sur T_{eau}

Il existe des bases de données donnant ces températures d'eau du réseau dans différentes villes mais nous n'y avons pas eu accès, notre convention signée avec MétéoFrance ne permettait pas de les avoir.

Remarque sur la contenance du ballon d'eau chaude.

Number of persons	Use	Collector surface	Storage volume	Number of persons	Use	Collector surface	Storage volume
 2-4		5.4 m² SOLARFOCUS 2 x CPC S1 at 2.7 m²	Approx. 300 l solar tank	 2-4	 90m²	13.5 m² SOLARFOCUS 5 x CPC S1 at 2.7 m²	800 l Buffer boiler or 800 l-SISP
 3-5		8.1 m² SOLARFOCUS 3 x CPC S1 at 2.7 m²	Approx. 300 - 500 l solar tank	 3-5	 120m²	16.2 m² SOLARFOCUS 6 x CPC S1 at 2.7 m²	1,000 l Buffer boiler or 1,000 l-SISP
 4-6		10.8 m² SOLARFOCUS 4 x CPC S1 at 2.7 m²	Approx. 500 - 750 l solar tank	 4-6	 150m²	21.6 m² SOLARFOCUS 7 x CPC S1 at 2.7 m²	1,500 l buffer tank and 400 l solar tank or 2,000 l-SISP

D'après le tableau précédent, on considère que :

- Si l'utilisateur choisit l'usage chauffage ou chauffage + ECS, son ballon a donc la capacité de chauffer un volume d'eau pour fournir son système en eau chaude et en chauffage (bien que le système de panneaux ne soit pas prévu pour l'ECS- tel est le cas pour le choix chauffage unique- son ballon doit tout de même être capable de

contenir l'eau chaude sanitaire à chauffer). Ainsi, on estime à 200L/personne le volume du stockage.

- Si l'utilisateur choisit uniquement l'usage ECS, son ballon doit donc être capable de contenir le volume d'eau chaude pour ECS. Il est cependant possible que le chauffage de l'habitation soit exclusivement alimenté par eau, bien que le système de panneaux ne permette pas de survenir au besoin de chauffage. Ainsi, si le chauffage est électrique, on estime à 75L/personne la contenance du ballon et 200L/personne si le chauffage n'est pas électrique.

(On admet que le chauffage est entièrement électrique ou entièrement alimenté par l'eau du ballon)

b. Besoin en chauffage

Les besoins en chauffage quotidiens sont :

$$B_{CHJ}(Wh/jour) = G * V * DJU * 24$$

Avec :

- G le coefficient de déperditions volumiques ($W/m^3.K$) : la valeur de G varie entre 0 et 3 et dépend de l'ancienneté de la maison, du type d'isolation...
- $V (m^3)$ le volume de la maison. On a choisi de faire la surface (m^2) * hauteur sous plafond (2,5m)
- DJU , (nombre de Degrés Jours Unifiés), ce paramètre représente la rigueur climatique d'un lieu. La formule quotidienne est

$$DJU = 18 - \frac{(T_{EXT})}{2} \text{ si } T_{EXT} < 0^{\circ}C \text{ sinon } DJU = 0$$

Remarques :

- On fixe la température de consigne à $18^{\circ}C$
- Il faudra repasser les besoins en chauffage en Joules par la suite

c. Choix de la méthode pour dimensionner nos panneaux solaires

Pour dimensionner l'installation (le nombre de panneaux solaires de surface unitaire X à mettre ensemble) en fonction des besoins de l'utilisateur, plusieurs approches peuvent exister:

- On peut essayer de passer par le rendement. Connaissant le rendement pour chaque mois (ou à l'année) pour un panneau solaire thermique unitaire, on peut alors déterminer la taille de l'installation en fonction d'un rendement souhaité (par exemple 50% à l'année ou 30% en janvier). Le principal problème est que, contrairement aux systèmes photovoltaïques, le rendement varie au cours de la journée en fonction des températures extérieures et des irradiances.

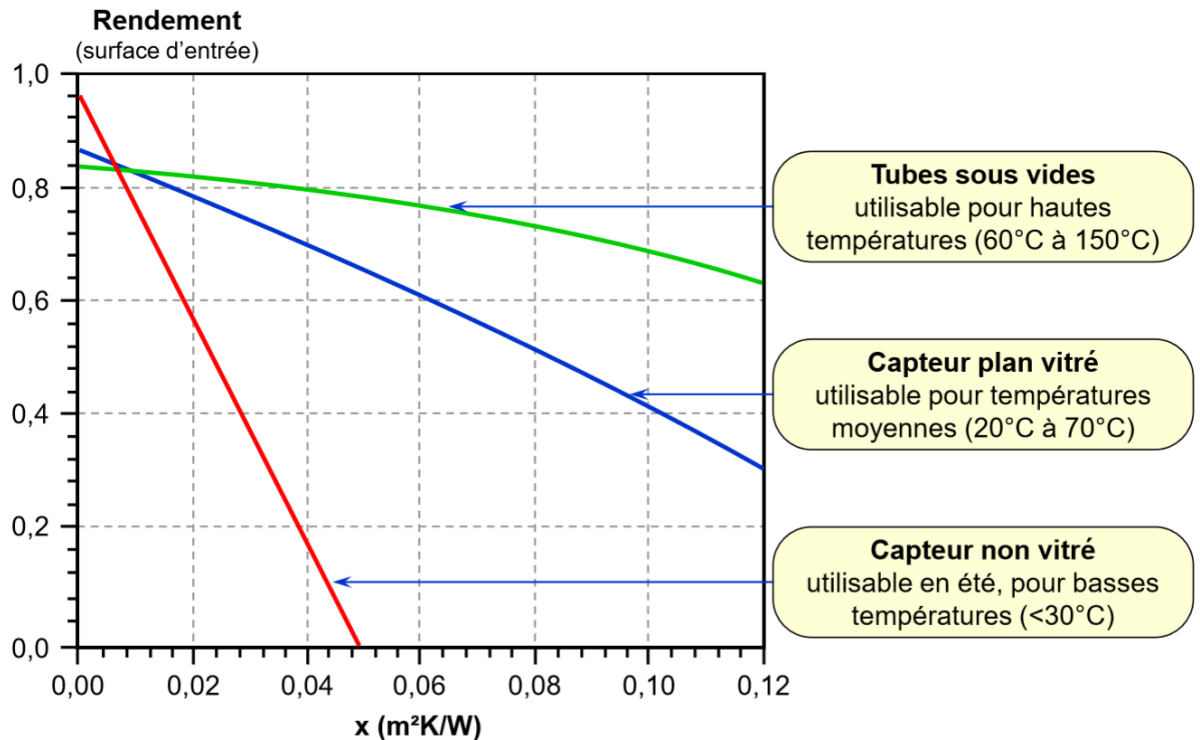
La formule du rendement est:

$$\eta = \eta_0 - \left(\alpha_1 * \frac{\Delta T}{PGP} \right) - \left(\alpha_2 * \frac{(\Delta T)^2}{PGP} \right)$$

avec PGP: l'irradiance sur plan incliné [W/m^2]

Le rendement varie donc en fonction de la température ainsi que de l'irradiance quotidiennement.

On a la courbe de rendement suivante:



Il aurait fallu alors traiter des données de Météo France (température extérieure, irradiance) à un pas rigoureusement faible (par ¼ d'heure ou par heure) pour être le plus proche de la réalité. Ces données étaient difficilement accessibles et la convention signée ne permettait pas d'avoir autant de points.

- Nous avons alors essayé une méthode plus "grossière". En partant des *IGP* moyens mensuels on détermine l'énergie solaire moyenne qui pourra vraiment être utilisé chaque mois selon le panneau utilisé.
Selon cette irradiation moyenne, on peut passer en irradiance moyenne (*PGP*) en utilisant la durée d'insolation (nombre d'heures en présence du soleil par mois) puis appliquer la formule du rendement.
Cette méthode, bien que nous retrouvions des résultats assez proches de données de logiciels (Calsol, Tecsol...), n'a pas de logique scientifique et n'a donc pas été gardée.
- Finalement, nous nous sommes dirigés vers la méthode F-chart qui est une méthode qui calcule directement le taux de couverture sans passer par le rendement. Seules des données quotidiennes suffisent. En fonction de ce taux de couverture, nous pouvons décider du dimensionnement et recalculer le rendement (voir ci-dessous).

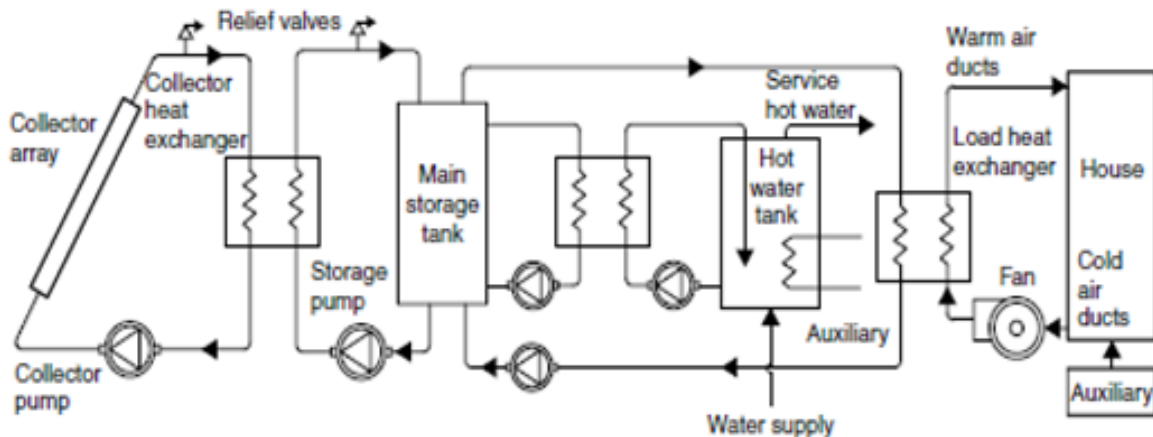
d. Méthode F-chart

Pour appliquer la méthode F-Chart, les données suivantes doivent être passées en Joules et être données par mois :

- Les IGP

- Les besoins en ECS
- Les besoins en chauffage

Le taux de couverture mensuel de la charge par l'énergie solaire (fraction solaire f) peut être évalué grâce à la méthode f-chart qui permet de calculer le rendement d'une installation de production de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Elle calcule la quantité d'énergie fournie par un système de chauffage via des capteurs solaires thermiques, en fonction des valeurs mensuelles d'irradiation, de la température intérieure et de la charge d'ECS et chauffage. Cette méthode développée par Duffie et Beckman a été établie à partir de corrélations d'un grand nombre de simulations. Elle considère le modèle suivant :



Ce système utilise de l'eau comme fluide de transfert de chaleur et comme support de stockage de l'énergie. Cette énergie est stockée sous forme de chaleur dans un ballon d'eau chaude et est ensuite utilisée pour chauffer l'habitation et pour l'approvisionnement en eau chaude. L'échangeur de chaleur eau-air (load heat exchanger) est utilisé pour transférer la chaleur du ballon vers l'habitat.

Un second échangeur est mis en place pour transférer la chaleur entre le ballon principal et le système d'eau chaude sanitaire. Ce système d'eau chaude domestique est composé d'un réservoir connecté avec le point de consommation d'ECS et le réseau d'eau froide. Un système auxiliaire est installé pour délivrer l'énergie nécessaire au chauffage de l'habitation lorsque le ballon d'eau est vide.

La méthode f-chart est fonction de deux paramètres sans dimension qu'il faut calculer pour chaque mois :

- X qui est le ratio des pertes du capteur par rapport à la charge:

$$X = \frac{\text{Pertes énergétiques mensuelles du capteur}}{\text{Charge mensuelle totale}}$$

- Y qui est le ratio du rayonnement absorbé par rapport à la charge:

$$Y = \frac{\text{Irradiation solaire collectée}}{\text{Charge mensuelle totale}}$$

X et Y peuvent s'écrire de la façon suivante :

$$X = \frac{S_C * F'_R * U_L (T_{ref} - T_{EXT}) * \Delta \tau}{B_{tot}}$$

$$Y = \frac{S_c * F'_{R} * U_L * (\tau\alpha) * IGP * N}{B_{tot}}$$

Avec :

S_c : surface des capteurs solaires (m²)

F'_R : facteur modifié d'évacuation de la chaleur du capteur solaire

U_L : coefficient global de pertes thermiques (W/m².°C)

Δt : nombre de secondes dans le mois

N : nombre de jours dans le mois considéré

$\tau\alpha$: produit de l'absorptivité-transmissivité moyenne mensuelle

Remarque : On a bien les IGP qui sont en Joules et mensuels

Certaines données ne sont pas facilement accessibles. Il est cependant possible de modifier les équations précédentes pour faire apparaître des données connues :

$$X = \Delta\tau * (T_{ref} - \bar{T}_a) * F_R U_L * \frac{F'_R}{F_R} * \frac{S_c}{B_{tot}}$$

$$Y = IGP * N * F_R (\tau\alpha)_n * \frac{F'_R}{F_R} * \frac{S_c}{B_{tot}} * \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n}$$

Avec :

$F_R U_L = a1$: coefficient de pertes thermiques (précisé dans la fiche technique du capteur)

$F_R \tau\alpha = \eta_0$: coefficient de gain optique ou rendement optique (précisé dans la fiche technique du capteur)

F'_R/F_R : coefficient qui est fonction de l'efficacité de l'échangeur (*collector heat exchanger*) et du ballon (qu'on prendra égal à 0.97)

$(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n = K_1 * K_2$ (pour un capteur sous vide) ou $K_1 (=K_2)$ (pour capteur plan vitré) : facteur d'angle

Facteurs correctifs

Les ratios X et Y sont des ratios théoriques en fonction de données précises, ils doivent être corrigés en fonction des données propres à nos stations ou au projet en cours (température d'eau du réseau, température extérieure, volume du ballon d'eau chaude...)

Le ratio X doit être corrigé en fonction de la température de l'eau froide du réseau et de la taille du ballon de stockage.

La méthode f-chart considère une capacité de ballon égale à 75 litres par mètre carré de capteur solaire thermique installé. Si la dimension du ballon est différente il faut corriger le ratio X et le multiplier par un coefficient correctif X_c/X :

$$A = \left(\frac{\text{Volume réel de stockage}}{\text{Volume standard de stockage}} \right)$$

$$\text{Si } 0.5 \leq A \leq 4.0, \frac{X_c}{X} = A^{-0.25}$$

$$\text{Sinon } \frac{X_c}{X} = 1$$

Pour prendre en compte les variations de température de l'eau froide T_{EAU} et pour obtenir une température d'eau chaude T_{CH} au-dessus d'un seuil acceptable, X doit être de nouveau multiplié par un facteur correctif X_{cc}/X (T_{EAU} et T_{CH} ont toutes les deux une influence sur les performances du réservoir d'eau) :

$$\frac{X_{cc}}{X} = \frac{11.6 + 1.18T_{CH} + 3.86T_{EAU} - 2.32T_{EXT}}{100 - T_{EXT}}$$

Si le système prend en compte le chauffage, le ratio Y doit également être corrigé. En effet un coefficient correctif doit être multiplié pour prendre en compte les caractéristiques de l'échangeur de chaleur.

$$Z = \frac{\varepsilon_L * C_{min}}{(UA)_h}$$

$$\text{Si } 0.5 \leq Z \leq 50, \frac{Y_c}{Y} = 0.39 + 0.65e^{\left(-\frac{0.139}{Z}\right)}$$

$$\text{Sinon } \frac{Y_c}{Y} = 1$$

Avec :

On fixe ici $\varepsilon_L = 0.7$

$(UA)_h = G \times V$

C_{min} : capacitance minimale entre celle de l'eau et de l'air en $W/^\circ C$

$$C_{min} = \frac{\text{débit} * \text{densité} * C_p}{1000}$$

Avec :

débit : débit de l'air devant le convecteur ou débit de l'eau dans le convecteur (L/s)

densité : densité de l'air ou de l'eau en fonction de la température (kg/m^3)

C_p : chaleur massique de l'air ou de l'eau

Remarque :

On a fixé un débit d'air à 500 L/S (faute d'avoir trouvé dans la littérature beaucoup d'informations à ce sujet, on fixe cette valeur d'après les valeurs exemples du document 'Solar Energy Engineering Processes and Systems –p593-596')

On considère deux types de chauffage : haute température (80°C) et basse température (35°C).

	Densité air (kg/m³)	Cp air (J/kg.°C)
Basse température	1.1774	1.0057
Haute température	0.9980	1.0090

Par ailleurs, on considère que la capacitance de l'air sera toujours la plus faible car la densité de l'eau est plus élevée (densité de l'eau de l'ordre de 1000 kg/m³ et densité de l'air de l'ordre de 1 kg/m³), elle est donc la seule à être prise en compte dans le calcul de notre méthode f-chart.

Remarque :

Il est néanmoins possible de calculer le débit d'eau dans un radiateur quelconque :

$$\text{débit} = \frac{P}{\Delta T * C_e * \rho * 10^{-3}} * \beta$$

P : puissance (W)

$\Delta T = 5$ (radiateur basse température) – 10 (radiateur haute température)

C_e : chaleur spécifique de l'eau (1,1628)

ρ = masse volumique de l'eau en kg/m³ pour une température donnée

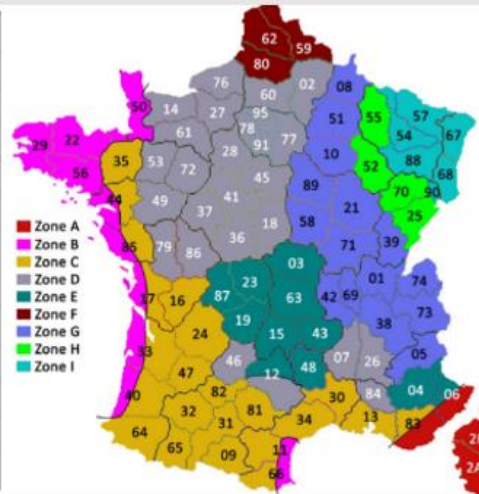
$\beta = 1,20$: valeur de 20% pour les émissions thermiques des conduites de raccordement

La puissance peut se calculer comme ci-dessous :

$$P = G * V * (T_{\text{confort}} - T_{\text{base}})$$

Tableau des températures de base en fonction de la localisation et de l'altitude :

Altitude	Zones selon le découpage de la carte								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
0 à 200m	-2	-4	-5	-7	-8	-9	-10	-12	-15
201 à 400m	-4	-5	-6	-8	-9	-10	-11	-13	-15
401 à 600m	-6	-6	-7	-9	-11	-11	-13	-15	-19
601 à 800m	-8	-7	-8	-11	-13	-12	-14	-17	-21
801 à 1000m	-10	-8	-9	-13	-15	-13	-17	-19	-23
1001 à 1200m	-12	-9	-10	-14	-17		-19	-21	-24
1201 à 1400m	-14	-10	-11	-15	-19		-21	-23	-25
1401 à 1600m	-16		-12		-21		-23	-24	
1601 à 1800m	-18		-13		-23		-24		
1801 à 2000m	-20		-14		-25		-25		
2001 à 2200m			-15		-27		-29		



Finalement, après avoir calculé l'ensemble des ratios et l'ensemble des coefficients correctifs, on peut calculer la fraction de la charge d'ECS et chauffage mensuelle couverte par le système :

$$f = 1.029 Y' - 0.065 X' - 0.245 Y'^2 + 0.0018 X'^2 + 0.0215 Y'^3$$

f : taux de couverture avec $0 \leq f \leq 1$

$$X' = \frac{X_{cc}}{X} * \frac{X_c}{X} * X$$

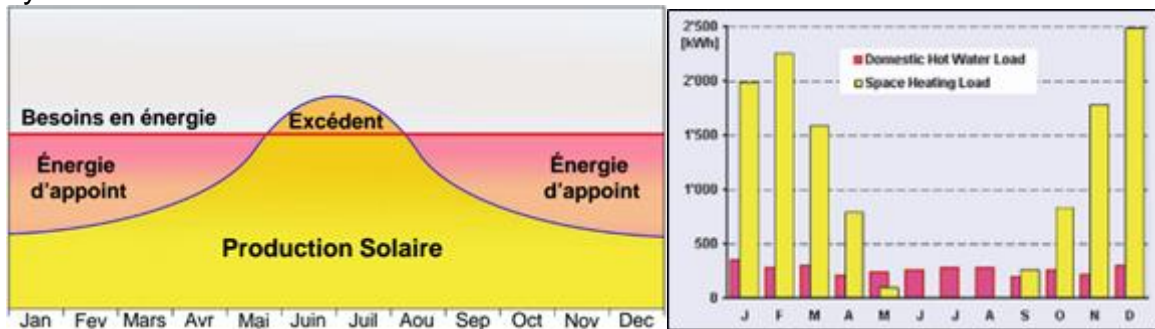
$$Y' = \frac{Y_c}{Y} * Y$$

L'objectif de la méthode f-chart est de fournir à l'utilisateur la surface de capteur à installer pour couvrir en totalité ou partiellement son besoin.

Il faut noter qu'il n'est pas toujours possible de le couvrir entièrement la charge pour plusieurs raisons :

- La surface du toit n'est pas suffisante pour accueillir la surface de panneaux nécessaire
- Lorsque l'utilisateur choisit une installation pour couvrir à la fois son besoin en ECS et en chauffage, l'apport en énergie pendant les mois d'été est supérieur au besoin ; la charge en eau chaude sanitaire est une donnée relativement constante pendant l'année mais le besoin en chauffage varie au cours de l'année. En effet, l'utilisateur ne chauffe pas sa maison pendant les mois dits chauds (mai, juin, juillet, août, septembre). Par ailleurs, c'est à cette même période que la ressource solaire est la plus importante. Ainsi, s'il veut couvrir entièrement son besoin annuel, l'apport en énergie sera bien supérieur au besoin comme le montre le graphique suivant. Au-delà de la perte énergétique que cela impliquerait, un surdimensionnement de l'installation en été peut avoir des conséquences néfastes sur le système. Les besoins étant entièrement satisfaits en été, l'eau ne circule plus, et la température du capteur solaire monte en degrés jusqu'à ce que l'énergie reçue et les déperditions thermiques soient

égales : le rendement devient donc nul et l'énergie utile n'est plus évacuée du capteur. La température de l'absorbeur s'élève jusqu'à atteindre un équilibre, la température de stagnation. Cela peut notamment entraîner l'ébullition de l'eau et peut endommager le système.



Pour éviter de détériorer l'installation, nous avons choisi de réaliser nos calculs avec un taux de couverture supérieur ou égal à 100% pour le mois de juillet quelque soit la charge. Ainsi, nous assurons le bon fonctionnement du système.

Notre calculateur détermine ainsi la surface de capteur nécessaire pour survenir entièrement au besoin au mois de juillet.

La méthode f-chart est donc un moyen efficace de déterminer facilement la performance thermique d'un système. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité et de sa capacité à estimer le taux de couverture total de la charge en ECS et chauffage. Son avantage majeur est qu'elle fournit une méthode de dimensionnement avec peu de calculs. Cependant, elle ne prend pas en compte plusieurs paramètres tels que par exemple le facteur a_2 , coefficient de déperdition quadratique du capteur.

Par ailleurs, elle se fonde sur un type de schéma particulier, c'est-à-dire une configuration fixée des échangeurs, réservoirs d'eau. De plus, la méthode utilise dans ses calculs une irradiation au pas quotidien quand d'autres sont plus précis et déterminent le rayonnement pour chaque heure de la journée.

Cependant, cette méthode est approuvée et donne des résultats cohérents et semblables à ceux des outils Calsol et Tecsol.

e. Taux annuel de couverture

La méthode f-chart nous permet de déterminer le taux de couverture pour chaque mois, nous pouvons donc facilement déterminer le taux annuel de couverture :

C'est la moyenne des taux mensuels de couverture

Suivant la taille unitaire du panneau, pour avoir un taux de couverture de 100%, il faut dans certains cas dépasser le seuil des 100% en juillet (d'autres mois peuvent alors avoir un seuil qui dépasse également les 100%). Le taux de couverture calculé précédemment est alors faussé car on utilise des taux supérieurs à 100%. Dans ce cas, nous réalisons une moyenne pondérée en prenant 100% pour tous les taux strictement supérieurs à 100%.

f. Apport solaire

Pour déterminer l'apport solaire quotidien (respectivement mensuel) :

$$A_{solaire}(KWh) = \text{taux de couverture} * B_{tot}$$

Pour avoir l'apport solaire ECS (quotidien ou mensuel) (KWh),

$$\% B_{ECS} * \text{apport solaire (KWh)}$$

Pour avoir l'apport solaire chauffage (quotidien ou mensuel) (KWh),

$$\% B_{chauffage} * \text{apport solaire (KWh)}$$

On a décidé de diviser l'apport solaire ECS et celui en chauffage en fonction du pourcentage de besoin. Certains logiciels préfèrent privilégier le chauffage et l'apport solaire est utilisé pour l'ECS que si le besoin en chauffage est complètement couvert.

g. Production annuelle

A partir des apports solaires mensuels on détermine la production annuelle des panneaux solaires thermiques (KWh)

$$\text{Production annuelle (KWh)} = \sum \text{apports solaires mensuels}$$

h. Rendement

$$\eta = \frac{\text{Production annuelle (KWh)}}{(\sum \text{IGP mensuel (KWh/m}^2)) * \text{surface du panneau}}$$

Raccordement en série/raccordement en parallèle : influence sur le rendement

Avec un agencement de capteurs en série, la température de l'eau qui circule au travers du système est plus importante mais les pertes thermiques sont également plus élevées. En effet, le second panneau chauffe de l'eau qui a déjà été préalablement montée en température par le premier panneau. L'effet est d'ailleurs plus important lorsqu'on travaille à débit réduit. La montée progressive de la température au travers des différents capteurs en série implique une baisse du rendement. Il est donc recommandé de ne pas raccorder trop de capteurs en série. On considère qu'on ne peut pas associer plus de 6 capteurs en série.

Le raccordement en parallèle est plus intéressant au niveau énergétique, mais cela n'est pas toujours possible aux vues des longueurs de tuyauterie nécessaires

