

Introduction

❖ Le contexte [16]

L'augmentation brutale du prix du pétrole survenue en 1973 a conduit une première fois l'homme à s'intéresser à des sources d'énergie renouvelables au premier rang desquelles l'énergie solaire. Les principales caractéristiques de l'énergie solaire ayant suscité l'intérêt qu'on lui a porté à l'époque étaient sa gratuité (nous y reviendrons), sa disponibilité sur une grande partie du globe terrestre et l'absence de risque d'épuisement connu par les sources d'énergie fossile.

On s'est vite aperçu que l'énergie solaire, contrairement à une idée répandue, n'est pas tout à fait gratuite : son utilisation nécessite un investissement de départ souvent plus lourd que pour les sources d'énergie conventionnelles et nombre d'installations solaires sont aujourd'hui à l'arrêt faute d'avoir prévu un budget pour la maintenance des équipements.

Toutefois, sans être totalement gratuite, l'énergie solaire présente des coûts de fonctionnement réduits et offre dans certains cas une alternative économiquement rentable par rapport aux sources d'énergie conventionnelles.

Le développement de l'utilisation de l'énergie solaire sera lié non seulement à ses avantages économiques (qui grandiront au fur et à mesure que les réserves d'énergie fossile diminueront) mais surtout à des considérations liées à la protection de l'environnement : pas de rejets polluants (fumées contenant du CO_2 et des NO_x par les centrales thermiques), pas de danger radioactif et de déchets encombrants (centrales nucléaires), possibilité de limitation de l'emploi des CFC (production de froid solaire par adsorption).

❖ Description du soleil [16]

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1 391 000 km (100 fois celui de la Terre), sa masse est de l'ordre de 2.10^{27} tonnes.

Toute l'énergie du Soleil provient de réactions thermonucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564.106 tonnes d'hydrogène en 560.10^6 tonnes d'Hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ($E = m c^2$), ce qui représente une énergie totale de 36.10^{22} kW. La Terre étant à une distance de 150.10^6 km du Soleil, elle reçoit une énergie de $1,8.10^{17}$ W.

La valeur du flux de rayonnement solaire E reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km

d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne E_0 est appelée la *constante solaire*, elle vaut $E_0 = 1353 \text{ W.m}^{-2}$. En première approximation, on peut calculer la valeur de E en fonction du numéro du jour de l'année j par :

$$E = E_0 [1 + 0,033 \cos (0,984 j)] \quad (\text{I.1})$$

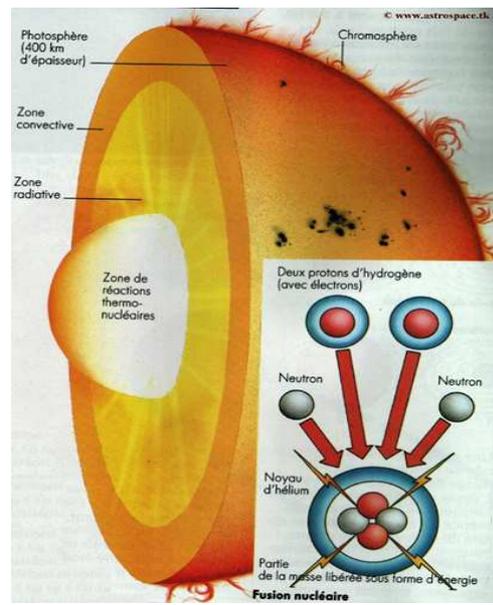


Figure I.1 : description du soleil [2]

On trouvera sur la figure I.2 la répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère.

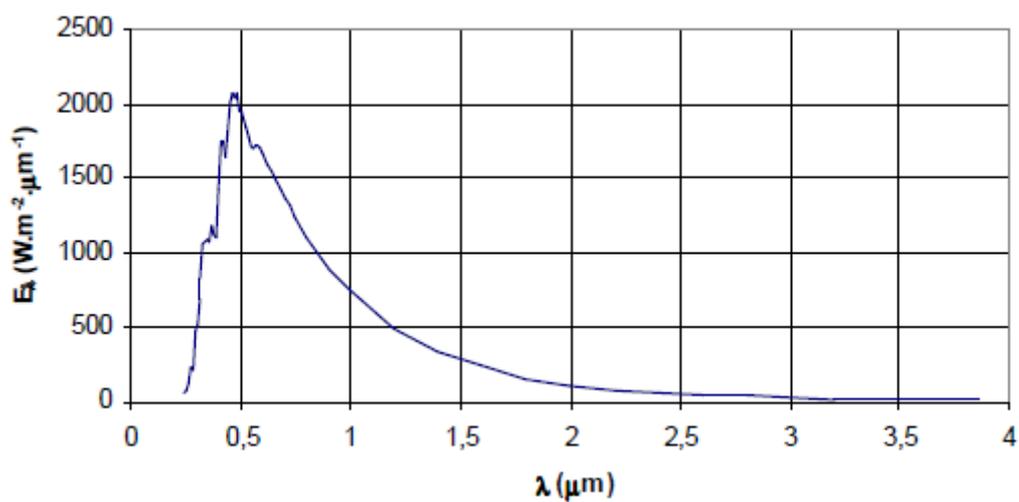


Figure I.2 : Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère.

On notera que 98% du rayonnement solaire est émis dans des longueurs d'onde inférieures à $4 \mu\text{m}$. En première approximation, le rayonnement solaire peut être assimilé au rayonnement d'un corps noir à une température de 5777 K .

I.1 Aspects géométriques [16]

Nous allons nous intéresser ici aux aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la Terre dans le but ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné placé à la surface de la Terre et orienté dans une direction fixée. La connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire.

I.1.1 Mouvements de la Terre

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'*écliptique*.

L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de $149\,675 \cdot 10^6 \text{ km}$.

La Terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la Terre est appelé l'*équateur*. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique : l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé *inclinaison* et qui vaut $23^\circ 27'$. Les mouvements de la Terre autour de son axe et autour du Soleil sont schématisés sur la figure I.3.

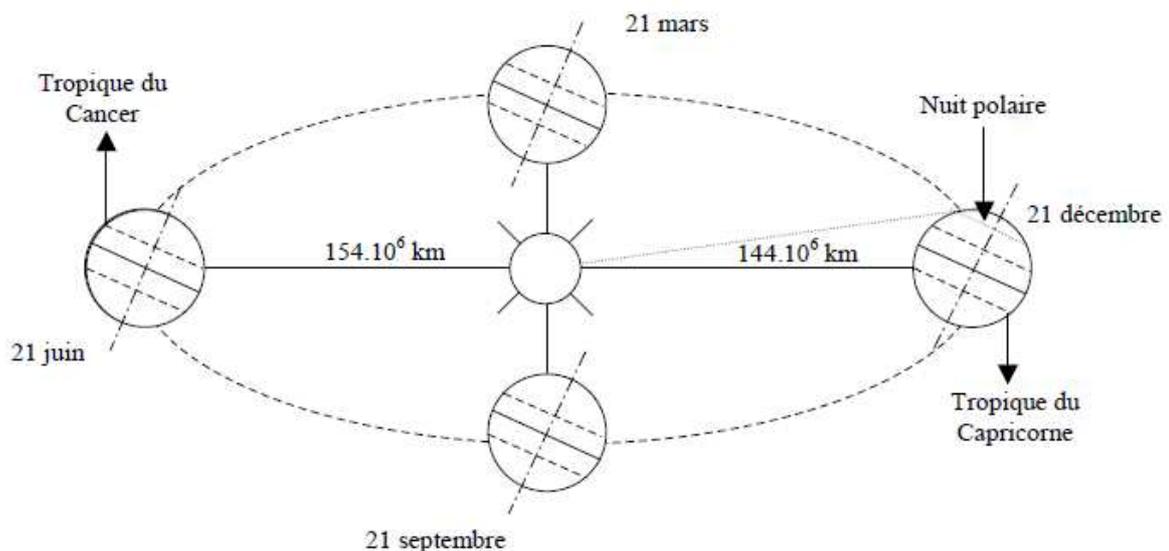


Figure I.3 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil

On appelle **déclinaison** δ l'angle formé par la direction du Soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre $-23,45^\circ$ et $+23,45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation :

$$\delta = 23,45^\circ \sin [0,980^\circ (j+284)] \quad (I.2)$$

Où j est le numéro du jour de l'année.

I.1.2 Mouvement apparent du Soleil

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude L au nord de l'équateur est représenté sur la figure I.4

Au midi solaire, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à $(L - \delta)$. La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre.

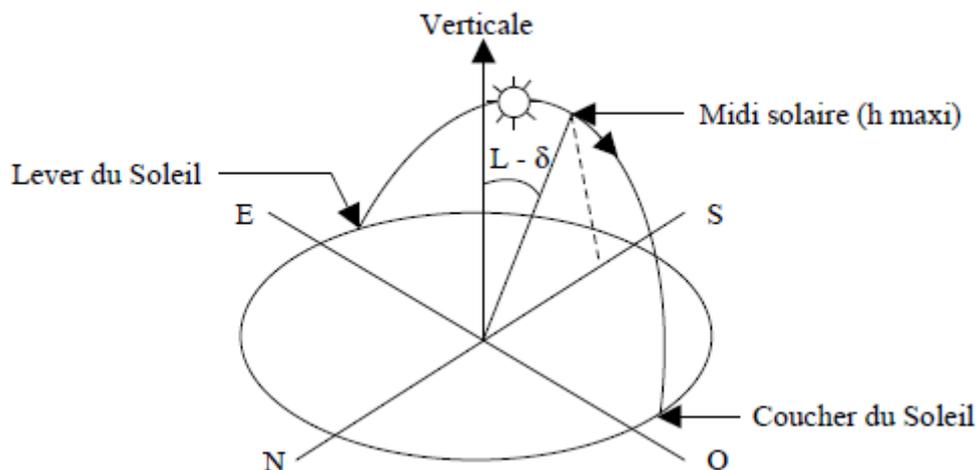


Figure I.4 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L

Le repérage du Soleil s'effectue par l'intermédiaire de deux angles :

- L'**azimut** a : c'est l'angle que fait la direction de la projection du Soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest.
- La **hauteur** h du Soleil : c'est l'angle que fait la direction du Soleil avec sa projection sur un plan horizontal.

Ces deux angles sont représentés sur la figure I .5

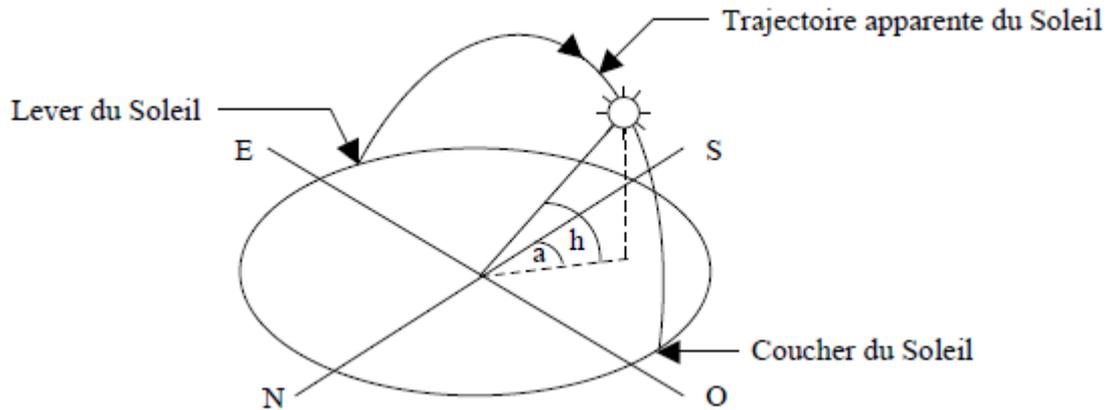


Figure I .5 : Repérage de la position du Soleil.

Ces deux angles sont fonction de :

- La latitude L du lieu
- La date j (numéro du jour de l'année)
- L'heure solaire TS dans la journée.

La latitude L et la date j servent à déterminer la trajectoire du Soleil dans le ciel et l'heure TS donne sa position instantanée sur cette trajectoire.

On définit le jour comme le temps mis par la Terre pour effectuer un tour sur elle-même. Un jour a été divisé en 24h et on a défini l'**heure solaire TS** en fixant TS = 12h lorsque la hauteur du Soleil est maximale (le Soleil est à son « zénith »).

On définit également l'**angle horaire ω** par :

$$\omega = 15^\circ (TS-12) \quad (I.3)$$

ω est compté positivement l'après-midi.

La hauteur h du Soleil peut alors se déduire de la relation :

$$\sin(h) = \sin(L) + \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (I.4)$$

Et l'azimut a par la relation :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (I.5)$$

I.1.3 Heures et temps

I.1.3.1 Durée du jour [16]

Le module ω_1 de l'angle horaire au lever du soleil s'obtient en écrivant $\sin(h) = 0$ dans la formule (I.4), ce qui conduit à :

$$\cos(\omega_1) = -\tan(L) \tan(\delta) \quad (\text{I.6})$$

L'heure solaire au lever du soleil a donc pour valeur :

$$(TS)_1 = 12 - \frac{\omega_1}{15} \quad (\text{I.7})$$

L'angle horaire ω_c au coucher du soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, nous avons donc $\omega_c = -\omega_1$ et la durée du jour vaut :

$$d = 2 \frac{\omega_1}{15} \quad (\text{I.8})$$

I.1.3.2 Temps solaire vrai (TSV) [1]

C'est le temps donné par les cadrans solaires. Il est défini à partir de la rotation quotidienne de la terre sur elle-même et son mouvement autour du soleil, mais à cause des irrégularités du mouvement de la terre, il ne peut pas servir d'échelle du temps. Il est donné par la relation suivante :

$$\text{TSV} = \text{TSM} + \text{ET} \quad (\text{I.9})$$

TSM : temps solaire moyen ;

ET : équation du temps.

Où encore :

$$\text{TSV} = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\text{I.10})$$

ω : en degré

I.1.3.3 Temps solaire moyen (TSM) [1]

On définit le temps moyen solaire en supposant un mouvement uniforme de la terre autour de son axe, et donc le jour solaire moyen dure 24 heures.

$$\text{TSM} = \text{TU} - \text{ET} \quad (\text{I.11})$$

TU : temps universel ;

ET : équation de temps.

Où encore :

$$TSM = TU \pm 4 (\varphi - \varphi_0) \quad (I.12)$$

φ : Longitude du lieu ;

φ_0 : Longitude de Greenwich = 0.

I.1.3.4 Equation du temps [1]

Elle indique la correction qui permet de passer du temps solaire vrai au temps solaire moyen. Cette correction varie de -14 à +16 minutes au cours de l'année. Cela veut dire que le soleil peut passer au méridien avec 16 minutes d'avance ou de 14 minutes de retard par rapport au temps moyen. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$ET = 9,87 \sin 2N' - 7,53 \cos N' - 1,5 \sin N' \quad (I.13)$$

Avec :

$$N' = \frac{36}{360} (n - 81) \quad (I.14)$$

N' : en degré ;

n : le quantième jour de l'année ;

ET : en minutes.

I.1.4 Durée et taux d'ensoleillement [16]

I.1.4.1 Durée d'ensoleillement

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent le Soleil, totalement ou partiellement, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol. On dit que la nébulosité est plus ou moins importante selon qu'il y a beaucoup ou peu de nuages.

On appelle *durée effective d'ensoleillement* ou *insolation SS* le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct a atteint le sol du lieu considéré. On appelle *rayonnement direct* le rayonnement qui atteint la surface terrestre sans avoir subi de déviation depuis son émission par le Soleil.

I.1.4.2 Taux d'ensoleillement

Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement SS_0 . On appelle taux d'ensoleillement ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement. :

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0} \quad (\text{I.15})$$

La durée maximale d'ensoleillement SS_0 pour un site dégagé peut être prise égale à la durée du jour calculée par la formule (I.8).

I.2 Aspects énergétiques [16]

I.2.1 L'atmosphère terrestre

I.2.1.1 Composition

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, ce sont :

- La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.
- La stratosphère entre 15 et 80 km d'altitude.
- L'ionosphère entre 80 et 200km d'altitude.

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de :

- CO_2 (0,03%)
- Vapeur d'eau : en quantité variable caractérisé par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.
- Ozone O_3 située entre 10 et 30 km d'altitude.
- Aérosols : grains de sable, poussières, fumées...

On trouvera sur la figure I.6 la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec indication des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement selon la longueur d'onde.

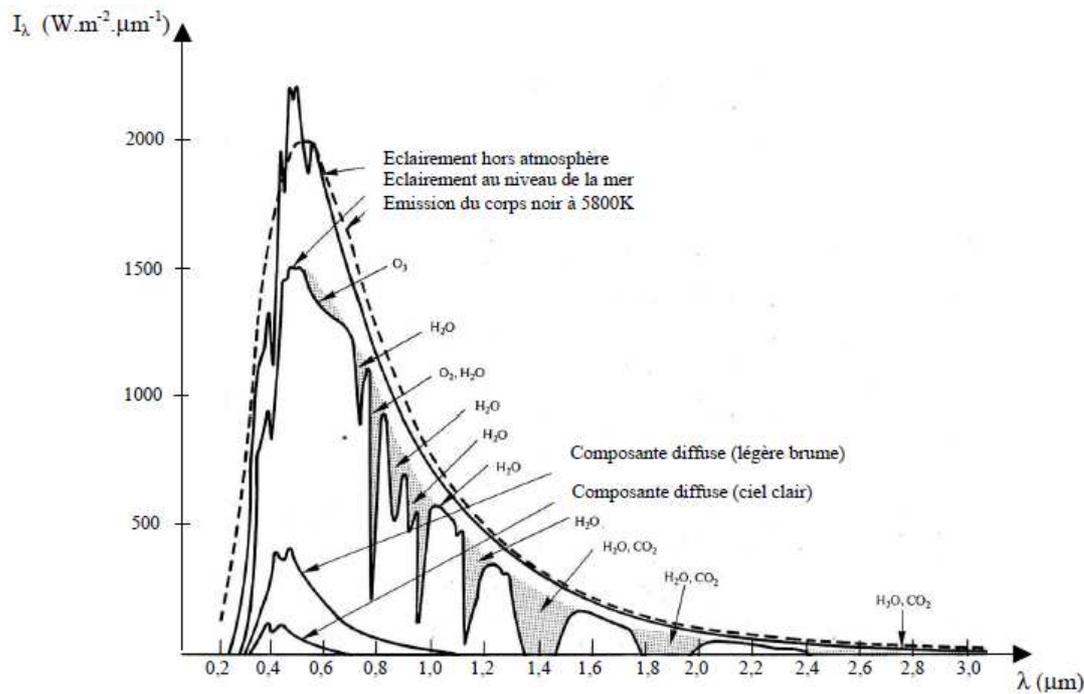


Figure I.6 : Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre.

1.2.1.2 Rayonnement du ciel et de l'atmosphère

Les gaz non transparents de l'atmosphère (CO_2 , O_3 , H_2O) émettent vers la Terre un rayonnement dans les principales bandes suivantes :

- vers $14,7 \mu\text{m}$ pour le CO_2 .
- Entre 5 et $7 \mu\text{m}$ et entre 14 et $20 \mu\text{m}$ pour la vapeur d'eau.
- Vers $9,6 \mu\text{m}$ pour O_3 .

Ainsi que la montre la figure I.7, il s'agit d'un rayonnement émis dans les grandes longueurs d'onde ($> 3 \mu\text{m}$) contrairement au rayonnement solaire émis dans des longueurs d'ondes inférieures à $3 \mu\text{m}$.

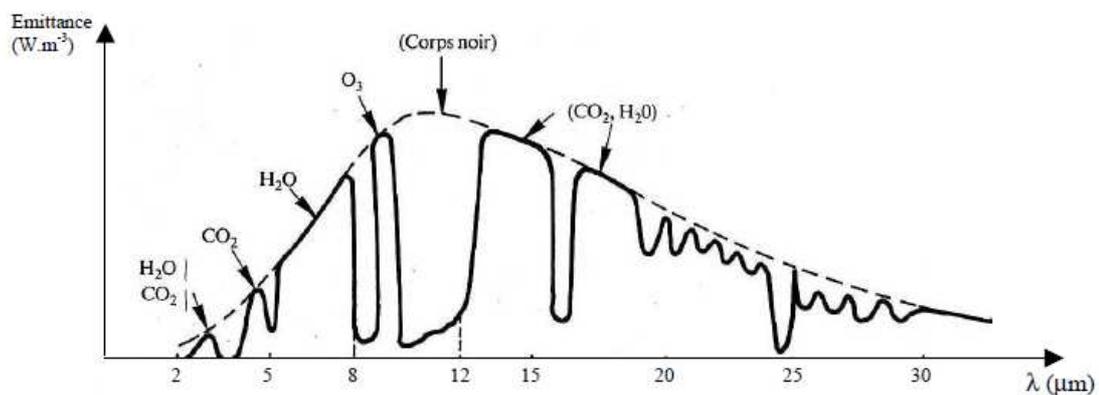


Figure I.7 : Spectre du rayonnement atmosphérique

La densité de flux Φ_{ciel} rayonnée par le ciel et l'atmosphère vers la Terre peut être calculé par :

$$\Phi_{\text{ciel}} = \sigma T_{\text{ciel}}^4 = \sigma \varepsilon_a T_a^4 \quad (\text{I.16})$$

Où T_{ciel} et ε_a sont donnés par l'une des corrélations suivantes :

$$T_{\text{ciel}} = T_a - 12 \quad (\text{I.17})$$

$$\varepsilon_a = 1 - 0,261 \exp [-7,77 \cdot 10^{-4} (T_a - 273)^2] \quad (\text{I.18})$$

$$\varepsilon_a = 0,787 + 0,764 \ln \left(\frac{T_{ra}}{273} \right) \quad (\text{I.19})$$

Où : T_{ra} Température de rosée de l'air en K

T_a Température de l'air en K

I.2.2 Rayonnement solaire au sol

I.2.2.1 Notation

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit :

- Le **rayonnement direct** est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- Le **rayonnement diffus** est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- Le **rayonnement global** est la somme du rayonnement direct et diffus.

Les notations utilisées pour les composantes du rayonnement solaire sur une surface horizontale sont données dans le tableau I.1.

Irradiation solaire Energie reçue pendant une certaine durée $\text{W.m}^{-2}.\text{durée}^{-1}$ ou $\text{kWh.m}^{-2}.\text{durée}^{-1}$	Directe	S	G = S + D
	Diffuse	D	
	Globale	G	
Eclairement solaire Flux instantané W.m^{-2}	Direct	S*	G* = S* + D*
	Diffus	D*	
	Global	G*	

Tableau I.1 : Rayonnement solaire sur un plan horizontal : notations utilisées

Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le Soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sous une incidence normale est désigné par I. Nous désignerons par :

✚ I l'énergie reçue (irradiation) en $W.m^{-2} . durée^{-1}$ ou $KWh.m^{-2} . durée^{-1}$

✚ I* le flux reçu (éclairage) en $W.m^{-2}$

Nous avons la relation :

$$S^* = I^* \sin(h) \quad (I.20)$$

I.2.2.2 Rayonnement direct

❖ Eclairage S*

L'éclairage solaire direct S* sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles :

- Par mesure de G* et D*, on en déduit $S^* = G^* - D^*$.
- A partir de la mesure des irradiances journalières globales G et diffuse D sur un plan horizontal, on en déduit S = G - D et S* par la fonction de répartition suivante :

$$S^* = \frac{\pi}{24} [a + b \cos(\omega)] \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_1)}{\sin(\omega_1) - \frac{\pi \omega_1}{180} \cos(\omega_1)} S \quad (I.21)$$

Où $a = 0,409 + 0,502 \sin(\omega_1 - 60^\circ)$

$b = 0,661 - 0,477 \sin(\omega_1 - 60^\circ)$

- A partir de la mesure de l'irradiation journalière globale G, on évalue l'irradiation journalière diffuse D par la corrélation de Collares-Pereira et Rabl :

$D = 0,99 G$	$K_T \leq 0,17$	(I.22)
$D = (1,188 - 2,272 K_T + 9,473 K_T^2 - 21,865 K_T^3 + 14,648 K_T^4) G$	$0,17 < K_T \leq 0,75$	
$D = (-0,54 K_T + 0,632) G$	$0,75 < K_T \leq 0,80$	
$D = 0,2 G$	$K_T \geq 0,80$	

Où :

$$K_T = \frac{G}{G_0} \quad (I.23)$$

G_0 étant l'irradiation journalière sur un plan horizontal placé au-dessus de l'atmosphère calculable par :

$$G_0 = 3,795 \cdot 10^4 \cos(L) \cos(\delta) \left[\sin(\omega_1) - \frac{\pi \omega_1}{180} \cos(\omega_1) \right] \quad (I.24)$$

Où ω_1 est en degré et G_0 en $\text{KJ} \cdot \text{m}^{-2}$

On calcule ensuite $S = G - D$ et on est ramené au cas précédent.

- d. A partir de la connaissance de la moyenne mensuelle de l'irradiation globale journalière G , on calcule l'irradiation diffuse journalière moyenne D par la corrélation de Collares-Pereira et Rabl :

$$D = \{0,775 + 0,00606 (\omega_1 - 90^\circ) - [0,505 + 0,00455 (\omega_1 - 90^\circ)] \cos(115 K_T - 103)\} G \quad (I.25)$$

Et on est ramené au cas b.

A partir de la mesure du taux d'ensoleillement σ , on évalue G par :

$$\begin{aligned} G &= G_0 [0,29 \cos(L) + 0,52 \sigma] && \text{Zone tropicale} \\ G &= G_0 [\sqrt{2\sigma + 1} - 0,72] && \text{France} \end{aligned} \quad (I.26)$$

Et on est ramené au cas précédent.

- e. On ne dispose d'aucune mesure : on peut évaluer le rayonnement direct sur un plan perpendiculaire au rayonnement solaire par la relation :

$$I^* = 1370 \exp \left[-\frac{TL}{0,9 + 9,4 \sin(h)} \right] \quad (I.27)$$

Où TL est le facteur de trouble de Linke calculable par :

$$TL = 2,4 + 14,6\beta + 0,4(1+2\beta) \ln(p_v) \quad (I.28)$$

β est le coefficient de trouble atmosphérique que l'on peut prendre égal à :

$\beta = 0,05$ en zone rurale

$\beta = 0,01$ en zone urbaine

$\beta = 0,2$ en zone industrielle ou polluée

p_v est la pression partielle de vapeur d'eau exprimée en mmHg.

On en déduit $S^* = I^* \sin(h)$

❖ Irradiation directe journalière S

L'irradiation directe journalière S sur un plan horizontal peut être déterminée de plusieurs manières en fonction des données disponibles :

- Par mesure directe de G et D on en déduit $S = G - D$.
- A partir de G , on calcule D par la formule (I.22) et on est ramené au cas précédent.
- A partir de la mesure du taux d'ensoleillement σ on évalue G par la formule (I.26) et

on est ramené au cas précédent.

- d. Par intégration sur la journée des valeurs de $S^* = I^* \sin(h)$, I^* étant calculé par la formule (I.27).

I.2.2.3 Rayonnement diffus

❖ Eclairement D^*

L'éclairement solaire diffus D^* sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles :

- a. Par mesure directe.
 b. A partir de la mesure de l'irradiation journalière diffuse D sur un plan horizontal, on déduit :

$$D^* = \frac{\pi}{24} [a + b \cos(\omega)] \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_1)}{\sin(\omega_1) - \frac{\pi \omega_1}{180} \cos(\omega_1)} D \quad (I.29)$$

- c. A partir de la mesure du taux d'ensoleillement σ , on évalue G par la formule (I.26) et on est ramené au cas précédent.
 d. Par utilisation de la corrélation suivante en l'absence de toute mesure :

$$D^* = 54,8 \sqrt{\sin(h)} [TL - 0,5 - \sqrt{\sin(h)}] \quad (I.30)$$

Où TL est le facteur de trouble de Linke calculable par la formule (I.28).

❖ Irradiation D

L'irradiation diffuse journalière D sur un plan horizontal peut être déterminée de plusieurs manières en fonction des données disponibles :

- a. Par mesure directe.
 b. A partir de la mesure de l'irradiation globale G sur un plan horizontal : on évalue D par la formule (I.25).
 c. A partir de la mesure du taux d'ensoleillement σ , on évalue G par la formule (I.26) et on est ramené au cas précédent.
 d. Par intégration des valeurs de D^* données par la corrélation (I.30) en l'absence de toute donnée.

I.3 définition de chauffe eau solaire

Un chauffe-eau solaire est un dispositif de captation de l'énergie solaire destiné à fournir partiellement ou totalement de l'Eau Chaude Sanitaire (ECS).

Ce type de chauffage permet habituellement de compléter les types de chauffage de l'eau exploitant d'autres sources énergétiques (électricité, énergies fossiles, biomasse, ...) dans certaines conditions il permet de les remplacer totalement. L'énergie solaire étant parfaitement renouvelable, ce remplacement permet de limiter efficacement les émissions de gaz à effet de serre ou la production de déchets nucléaires. [18]

Ce dernier est un système équipé d'un ou de plusieurs panneau(x) solaire(s) produisant de l'eau chaude pour les besoins en eau chaude sanitaire. On utilise la dénomination de CESI (Chauffe Eau Solaire Individuel) qui est équipé simplement de panneaux solaires et d'un réseau de circulation avec pompe faisant circuler l'eau chaude dans un ballon solaire. Un appoint d'énergie est nécessaire pour compenser les besoins hors couverture solaire. Cet appoint peut être apporté par une simple résistance électrique, ou par une chaudière ou une pompe à chaleur. [19]

Les chauffe-eau solaires ont recours à l'énergie du soleil pour chauffer l'eau, en se basant sur deux systèmes solaires : [20]

I.3.1 les systèmes solaires passifs

Les systèmes solaires passifs préchauffent l'eau dans un capteur solaire et la transfèrent ensuite par pression de fluide à un chauffe-eau à réservoir de stockage ordinaire alimenté à l'électricité, au gaz ou au mazout.

I.3.2 Les systèmes solaires actifs

Les systèmes solaires **actifs**, par contre, utilisent des pompes et des commandes pour faire passer l'eau chaude du collecteur au réservoir. Dans les régions où la température descend sous le point de congélation, une solution antigel est habituellement utilisée comme fluide dans les capteurs, et est ensuite passée dans un échangeur thermique pour chauffer l'eau de la maison.

I.4 les types de chauffe eau solaire

I.4.1 chauffe eau solaire monobloc [21]

Les Capteurs et le ballon sont groupés sur un même châssis rigide et placés à l'extérieur. Ils peuvent être installés en toiture, sur terrasse ou au sol et fonctionnent sans électricité. Ce système est simple et peu coûteux. Mais le ballon se refroidit plus rapidement, même s'il est bien isolé. Il peut servir à préchauffer l'eau qui alimente un équipement classique existant.

Ce chauffe-eau est compact et bien adapté à la pose sur supports inclinés, en toiture-terrasse. Il se prête moins bien à la fixation sur un toit en pente.



Figure I-8 : chauffe eau solaire monobloc [22]

I.4.2 chauffe eau solaire à éléments séparés [23]

Le ballon est à l'abri dans une pièce de la maison ou une construction attenante loin des capteurs, ce qui nécessite une circulation du liquide. Celle-ci peut être naturellement obtenue par thermosiphon, ou « forcée » par une pompe électrique.

I.4.2.1 Le chauffe-eau solaire à “thermosiphon”

Thermosiphon veut dire que la circulation de la chaleur passe des capteurs au ballon naturellement sans pompe ou autre dispositif, grâce aux différences de température. Pour ce faire, le ballon doit impérativement être placé plus haut que les capteurs et les circuits hydrauliques doivent être installés dans les règles de l'art afin de faciliter la thermocirculation.

➤ **Avantage:**

Ce type de chauffe-eau solaire est très simple les risques de pannes sont faibles. Les coûts sont restreints et les performances, surtout dans les régions ensoleillées (comme le Sud de la France), sont excellentes.



Figure I.9 : chauffe eau solaire à thermosiphon [24]

I.4.2.2 Le chauffe-eau solaire avec pompe et régulation

Ce type de chauffe-eau solaire “à circulation forcée” est adapté à toutes les différentes configurations. Ainsi, le ballon peut être éloigné des capteurs. Il est plus cher que les systèmes précédents à cause des équipements supplémentaires. En effet, il faut une pompe pour transférer la chaleur des capteurs au ballon, ainsi qu’un système de régulation électronique. La plupart des fabricants proposent un “groupe de transfert” qui regroupe tous ces équipements annexes.

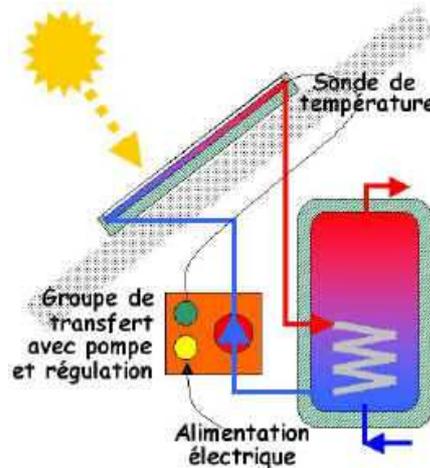


Figure I.10 : chauffe-eau solaire avec pompe et régulation [25]

I.5 chauffe eau solaires individuels

Un chauffe-eau solaire individuel (CESI) permet de capter l'énergie solaire pour fournir de l'eau chaude pour différents usages : sanitaire, lave linge, piscine...

Il se compose de capteurs solaires thermiques posés en toiture, d'un système de circulation et de régulation et d'un ballon de stockage d'eau chaude. Ce système peut-être utilisé indépendamment du système de chauffage avec par exemple une résistance électrique qui sert d'appoint ou avec celui-ci et dans ce cas c'est la chaudière qui sert d'appoint. [26]

Il existe différentes catégories de chauffe-eau solaires individuels, qui dépendent essentiellement des conditions climatiques des régions dans lesquelles ils sont utilisés.

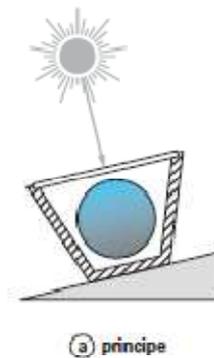
I.5.1 Chauffe-eau stockeur [3]

Le principe du chauffe-eau stockeur (ou autostockeur) est très ancien. Il est constitué d'un réservoir disposé dans un coffre isolant et protégé par une couverture transparente (figure I.11.a).

Pendant la période d'ensoleillement, la température du ballon, recouvert d'un revêtement absorbant noir, s'élève.

Pour éviter que celle-ci ne diminue pendant la nuit, le revêtement est généralement du type « sélectif ». Avant que ces revêtements n'existent, il était courant de rencontrer des chauffe-eau munis d'un double vitrage ou d'un volet isolant qui était disposé sur le capteur, hors période d'ensoleillement.

Ce type de chauffe-eau (figure I .11.b) est bien adapté aux régions où le risque de gel n'existe pas et où la température ambiante nocturne est très élevée. C'est, en particulier, le cas des régions tropicales.



(b) vue générale

Figure I.11 : Chauffe-eau stockeur

I.5.2 chauffe eau à thermosiphon

Les capteurs et le ballon sont distincts et distants, le ballon est placé plus haut que les capteurs afin que l'eau chaude s'élève naturellement. [27]

Lorsque le ballon de stockage de l'ECS se situe séparément et au-dessus des capteurs, le chauffe-eau à convection naturelle (" thermosiphon ") peut être installé. Comme dans le chauffe-eau solaire monobloc, c'est la variation de température obtenue par l'échauffement

qui entraîne la mise en mouvement du liquide, alors transféré jusqu'au ballon. Le dimensionnement de ce type d'installation doit être effectué de manière à réduire au maximum les pertes de charges dans le circuit. La mise en circulation du fluide s'effectue en général pour des différences de température (capteur/ballon) de 15°C. Les performances de ce procédé sont relativement réduites en hiver, à cause des fortes déperditions et du faible rendement. [26]

Pour que le dispositif fonctionne le ballon doit être placé plus haut que les capteurs : [27]

- Les capteurs peuvent être placés sur le sol ou sur le toit.
- Si les capteurs sont sur le toit, ce dispositif n'est possible que si vous avez un grenier qui permettra de placer le ballon plus haut que les capteurs.
- Si vous ne pouvez pas placer le ballon plus haut que les capteurs, ce système ne fonctionnera pas, vous devrez opter pour un autre type de chauffe eau solaire qui permet d'élever le liquide caloporteur avec une pompe électrique.



Figure I .12 : chauffe eau à thermosiphon [3]

I .5.3 chauffe eau avec échangeur

L'échange de chaleur à l'intérieur de la cuve de stockage est médiocre et difficile à estimer car il se fait en convection naturelle, la solution la plus simple et la plus utilisée est de placer un échangeur dans la cuve, la circulation se fait dans le circuit primaire (capteur, échangeur, capteur), le fluide caloporteur en générale est un mélange d'eau et d'antigel afin d'éviter de faire éclater les capteurs et conduites en hiver (la nuit).

Ces chauffe-eau solaires ont une bonne stratification, mais leur coût est élevé à cause de l'échangeur et l'antigel. [4]

I.5.4 chauffe eau avec circulateur [28]

Le circuit primaire se compose d'un capteur en série avec l'échangeur Ech. Et le circulateur P.

Le fluide qui parcourt le circuit primaire est de l'eau additionné d'antigel spécial, non nocif pour la santé en cas de fuite. On pourrait envisager de faire circuler directement l'eau sanitaire dans le capteur, sans échangeur mais cette méthode présente toutes sortes d'inconvénient : gel, dépôt de calcaire et encrassement du capteur.

Comme la circulation est forcée, le parcours des tubes dans le capteur n'a pas grande importance, contrairement à l'exemple ci-dessus.

Le circulateur ne fonctionne que si la différence entre la température en sortie de capteur est supérieure à la température du fluide en sortie de ballon. Un système de régulation simple est nécessaire.

La situation du capteur est indifférente, on a toutefois intérêt à le placer au plus près du ballon pour réduire les pertes.

Pour compenser l'augmentation de pression dans le circuit primaire due à la dilatation lors des variations de température, il est nécessaire d'ajouter un vase d'expansion et une soupape de sécurité. On doit aussi pouvoir purger le circuit en plaçant une petite vanne en partie haute.

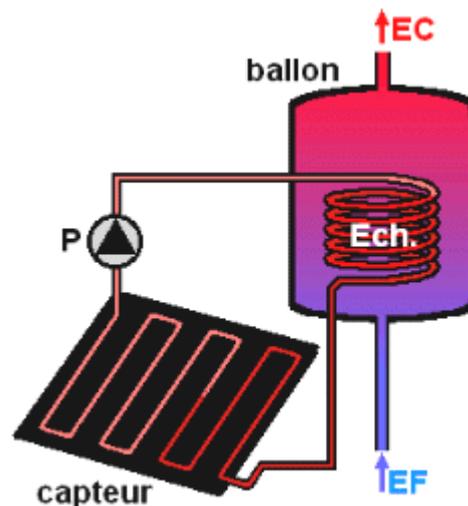


Figure I.13 : chauffe eau avec circulateur

I.6 chauffe eau solaires collectifs

I.6.1 définition [29]

Adapté à la taille et aux besoins limités d'une famille, le principe du chauffe-eau solaire individuel peut être étendu à des consommations plus importantes d'eau chaude sanitaire.

On parle alors de "chauffe-eau solaire collectif", ou d'installation collective de production d'eau chaude solaire.

Dans les immeubles de logements, dans les maisons de retraite, hôpitaux, hôtels et hébergements de vacances, des installations solaires adaptées sont envisageables, pour des bâtiments existants à rénover, ou à l'occasion de nouveaux projets de construction.

Dans les installations collectives, la boucle primaire comporte presque toujours un échangeur extérieur et la source d'énergie d'appoint. Quelque soit la surface des capteurs on ne peut éviter la période sans soleil suffisamment prolongé, pour épuiser le stockage d'énergie solaire à ce moment la chaleur nécessaire ne peut être produite que par une installation de chauffage d'appoint.

L'eau froide d'alimentation est placée à l'entrée de l'échangeur de chaleur et non dans la cuve de stockage, cela permet de maintenir le fluide passant à travers les capteurs à une température relativement élevée et ainsi d'améliorer le rendement de conversion.

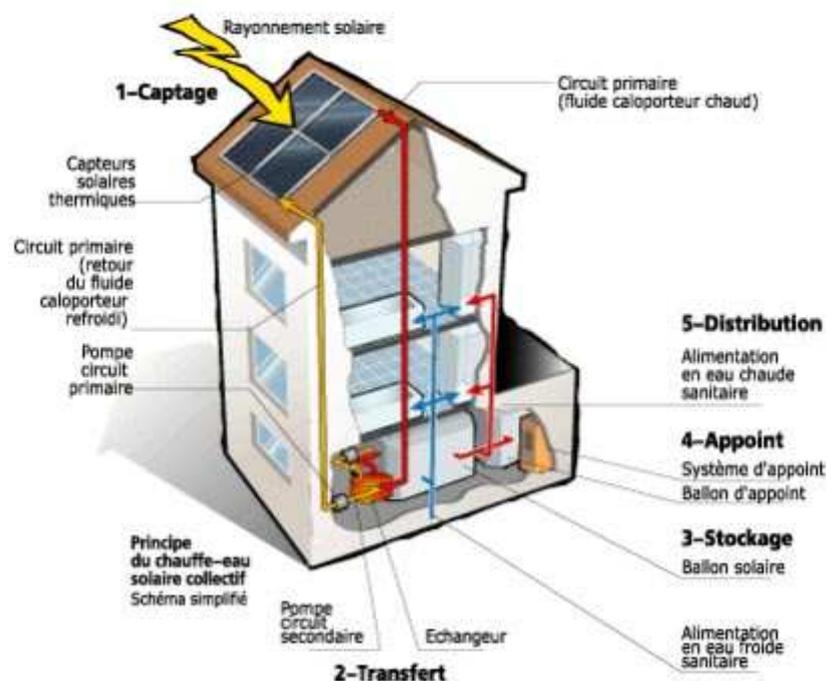


Figure I.14 : chauffe eau solaire collectif

I.6.2 Principaux cas d'utilisation [3]

Des systèmes collectifs de production d'eau chaude, associés à des dispositifs d'appoint utilisant des énergies conventionnelles, se rencontrent dans de nombreux secteurs (tertiaire, résidentiel, équipements sportifs...). La production peut être assurée soit de façon collective avec un appoint centralisé et une répartition de l'eau chaude au niveau de chaque point de consommation, soit produite de façon décentralisée tant au niveau du dispositif solaire que de l'appoint.

I.6.2.1 Eau chaude sanitaire

La consommation d'eau chaude est un élément essentiel de la détermination du chauffe-eau solaire. Elle doit être connue avec le plus de précision possible et, lorsqu'il s'agit d'un établissement existant, on procédera autant que possible à des mesures de consommation préalables. On notera que, pour ce qui concerne la performance future du système solaire, il est préférable de sous-estimer les consommations plutôt que de les surestimer.

I.6.2.2 Eau chaude industrielle

L'énergie solaire peut être utilisée pour assurer les besoins d'eau chaude sanitaire dans le secteur industriel. Si le niveau de température est élevé, il s'agira le plus souvent d'apporter, grâce à l'énergie solaire, un préchauffage de l'eau. Lorsque les besoins d'eau chaude sont importants, il sera nécessaire de bien connaître les profils de consommation journaliers et hebdomadaires afin de calculer avec précision le volume de ballons de stockage.

I.6.3 Schémas types d'installations [30]

L'installation solaire collective comprend le plus souvent un échangeur externe entre le circuit capteurs (circuit primaire) et le circuit eau chaude.

L'installation comprendra également :

- ❖ Une régulation spécifique pour eau chaude collective
- ❖ Des pompes de circulation
- ❖ Un vase d'expansion
- ❖ Une panoplie d'accessoires hydrauliques (vannes d'arrêt, d'équilibrage, clapet, dispositifs de sécurité...)

- ❖ Une métrologie (compteurs volumétriques, sondes de températures ECS) et son dispositif de traitement et de communication permettant la télé suivi pour mise en œuvre de la GRS.

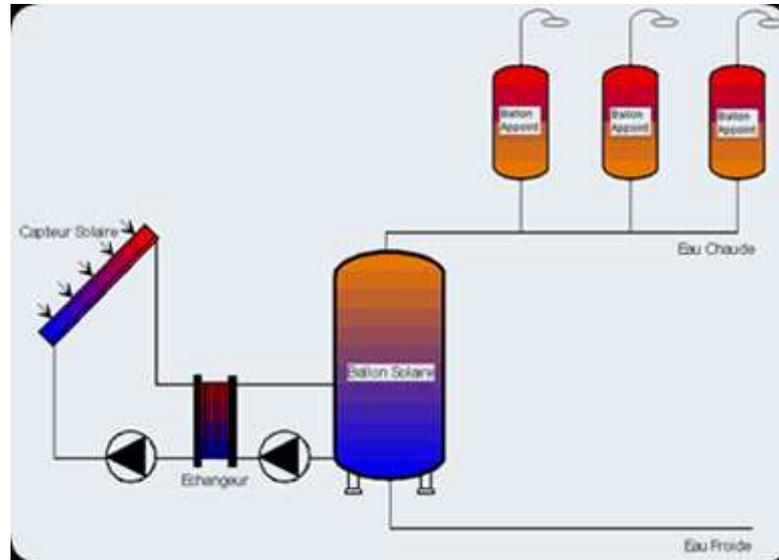


Figure I.15 : Chauffe-eau solaire collectif avec appoint individualisé

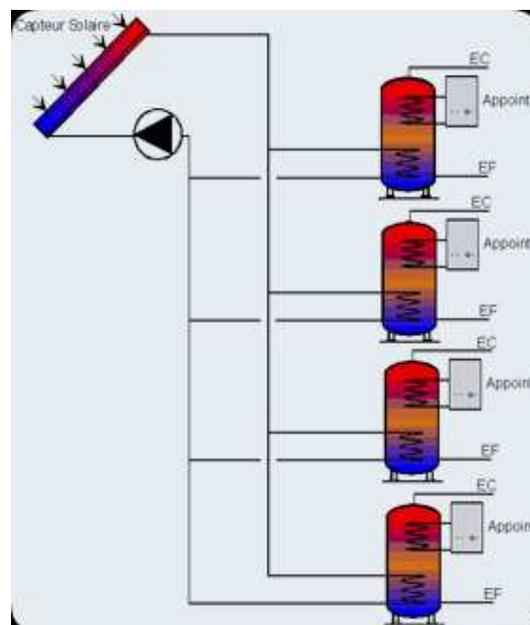


Figure I.16 : Chauffe-eau solaire collectif individualisé
(Plutôt utilisés pour les bâtiments résidentiels)