

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté des Sciences

Département de Physique



جامعة محمد بوضياف - المسيلة

كلية العلوم

قسم الفيزياء

المسيلة في : 2021/11/13

رقم: 303/ل.ع.ق.ف/2021

مستخرج من محضر اجتماع اللجنة العلمية لقسم الفيزياء رقم 9(2021)

تبعاً لاجتماع اللجنة العلمية المنعقد بتاريخ 2021/06/13 والذي تم فيه قبول ملف مطبوعة الدروس المقدمة من طرف الأستاذة نادية بن منصور

تحت عنوان:

Conversion photothermique

وطبقاً لتقارير الخبرة الايجابية المقدمة من طرف كلا من الأساتذة :

جامعة المسيلة	استاذ.م.أ	سالي محمد
جامعة المسيلة	استاذ.م.أ	بن دراجي رزيق

فقد صادقت اللجنة على قبول مطبوعة الدروس البيداغوجية هذه .

رئيس اللجنة العلمية لقسم الفيزياء

عبدالله سي



Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique
Université Mohamed Boudiaf - M'sila
Faculté des sciences



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة محمد بوضياف - المسيلة
كلية العلوم

Département de Physique

Polycopie de cours

Conversion photothermique

Option : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Par : Dr. Benmansour Nadia

Sommaire

I. Introduction.....	3
Chapitre I. Effet de serre et surfaces sélectives	
I.1. Effet de serre.....	5
I.2. Surfaces sélectives.....	6
I.2.1. Critères de choix d'une surface sélective.....	7
I.2.2. Différents types d'absorbeurs sélectifs.....	8
I.2.3. Vitrages sélectives.....	11
Chapitre II. Fluide caloporteur et échangeurs	
II.1. Fluide caloporteur.....	15
II.1.1. Principaux fluide caloporteurs.....	16
II.2. Echangeur thermique.....	17
II.2.1. Principe générale.....	18
II.2.2. Configurations géométriques.....	18
II.2.3. Etude d'un échangeur.....	21
Chapitre III. Capteurs photothermiques	
III.1. Capteurs plans.....	28
III.1.1. Types des capteurs solaires plans.....	31
III.2. Collecteurs à tubes sous vide.....	33
III.3. Capteurs concentrateurs.....	34
III.4. Bilan thermique d'un capteur plan.....	35
III.5. Rendement d'un capteur solaire.....	36
Chapitre IV. Convertisseurs photothermiques aux basses et aux moyennes températures	
IV.1. Cloche jardinier.....	39
IV.2. Capteur à air.....	39
IV.3. Distillateur solaire.....	41
IV.4. Capteurs à eau.....	46
IV.5. Tour solaire.....	46
IV.6. Capteurs vitrés.....	48
IV.6.1. Production d'eau chaude.....	48
IV.6.2. Chauffage des habitations.....	51

IV.6.3. Climatisation.....	52
----------------------------	----

Chapitre V. Convertisseurs photothermiques aux hautes températures

V.1. Les capteurs solaires thermodynamiques.....	56
--	----

V.1.1. Les systèmes de concentration.....	56
---	----

V.1.2. Centrale à tour.....	57
-----------------------------	----

V.1.3. Centrale à collecteur cylindro-parabolique.....	58
--	----

V.1.4. Centrale à collecteur parabolique.....	59
--	----

Annexe : Exercices.....	60
--------------------------------	-----------

Références.....	67
------------------------	-----------

Introduction

Avant la crise énergétique de 1973, l'énergie solaire n'était presque pas explorée, sauf par quelques laboratoires universitaires éparpillés dans le monde. Cependant, de nos jours, cette source d'énergie renouvelable suscite un intérêt croissant.

Dans le domaine de l'énergie solaire, qui est la science appliquée de l'exploitation de l'énergie solaire, plusieurs méthodes de conversion de cette énergie ont été explorées ces dernières années, et elles sont désormais utilisées dans de nombreuses applications: le chauffage domestique, la production d'électricité, le traitement des matériaux (réfractaires), la production d'hydrogène, de méthane, etc.

Le type de conversion le plus couramment est la conversion photo-thermique qui consiste en une transformation directe du rayonnement solaire en chaleur et de conversion indirecte lorsque le rayonnement subit au moins une transformation préalable : conversion thermodynamique, conversion thermo-chimique.

La conversion photo-thermique peut constituer un apport d'énergie non négligeable pour un grand nombre d'applications thermiques, thermomécaniques et thermo-chimiques à condition que des rendements de conversion élevés puissent être atteints dans une gamme de températures relativement étendue.

Quatre catégories d'applications se dégagent en fonction de la température :

- Applications aux basses températures solaires ($T < 60^{\circ}\text{C}$) : chauffage de l'eau sanitaire, chauffage des piscines...,
- Applications aux moyennes températures solaires ($60^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$) : chauffage des habitations, réfrigération, climatisation, dessalement de l'eau de mer, production d'énergie mécanique...,
- Applications aux hautes températures solaires ($150^{\circ}\text{C} < T < 800^{\circ}\text{C}$) : production d'énergie mécanique, production de vapeur, dissociation catalytique de l'eau...,
- Applications aux très hautes températures solaires ($T > 800^{\circ}\text{C}$) : dissociation thermique de l'eau, magnétohydrodynamique, thermo-électricité).

La conversion photo-thermique peut être réalisée par deux procédés différents : l'effet de serre ou la concentration.

Chapitre I: Effet de serre et surfaces sélectives

I. Effet de serre et surfaces sélectives

I.1. Effet de serre

L'effet de serre est basé sur le principe que le rayonnement infrarouge émis par la surface de l'absorbeur a une longueur d'onde différente de celle du rayonnement solaire. La couverture, qu'elle soit en verre ou en plastique transparent, laisse passer le rayonnement solaire mais bloque le rayonnement infrarouge: Le rayonnement solaire, capté par l'absorbeur, est réémis sous forme de rayons infrarouges vers la couverture transparente, qui le bloque et le renvoie à nouveau vers l'absorbeur (soit par réflexion, soit par échauffement de la couverture). Tant que le soleil alimente le capteur, le phénomène d'effet de serre se poursuit, entraînant une accumulation de chaleur et une élévation de la température de l'absorbeur. On désigne par effet de serre simple la situation où il n'y a qu'une seule vitre au-dessus de l'absorbeur, tandis que l'effet de serre multiple se réfère à un nombre de couvertures transparentes supérieur à un [1].

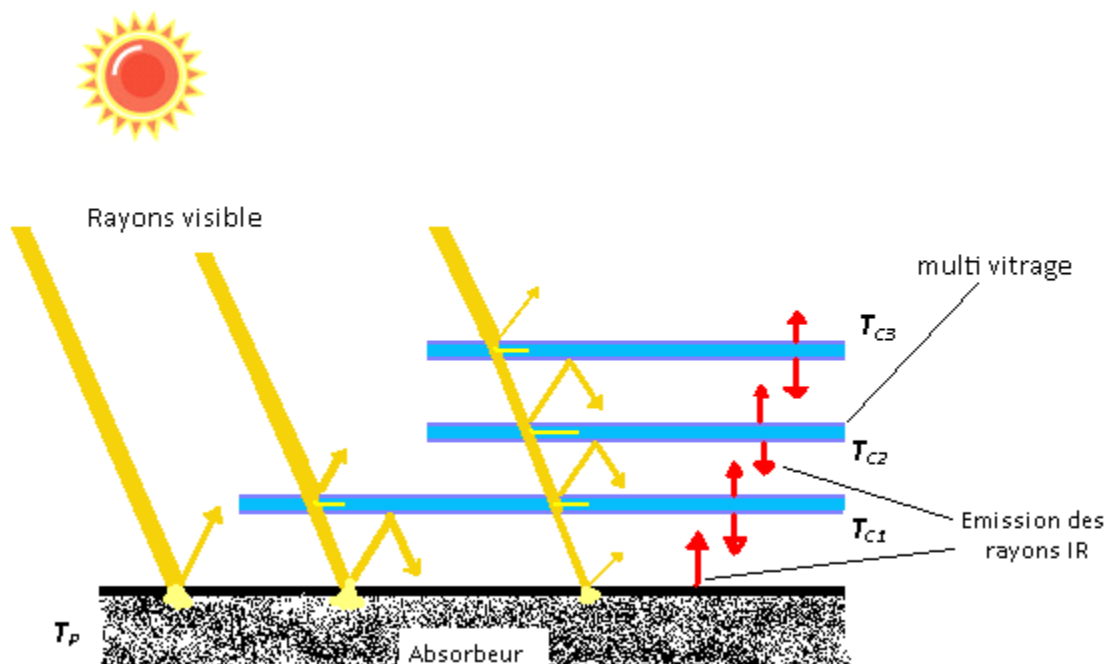


Figure I.1 : Principe de l'effet de serre

Le rôle de la couverture est essentiellement de réaliser une isolation optique de la face avant de l'absorbeur. Cette isolation doit avoir le comportement particulier suivant :

- Laisser se produire le maximum d'échange d'énergie dans le sens de l'environnement vers l'absorbeur ($\tau_c \cong 1$)

- S'opposer à tous les échanges inverses c'est-à-dire de l'absorbeur vers l'environnement ($\tau_{ci} \cong 0$)

Pratiquement la couverture est opaque dans le domaine de l'infrarouge (non transparente pour les rayons infrarouge ($\Delta\lambda_{IR}$)).

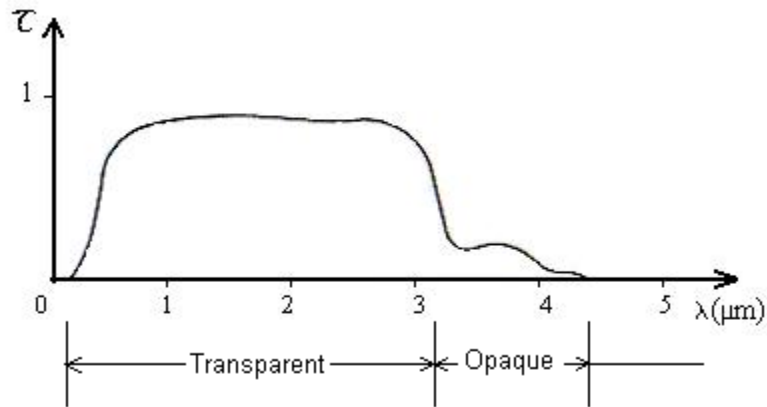


Figure I.2: Coefficient de transmission d'une lame de verre.

Dans les capteurs solaires plans, cette opacité peut prévenir de deux comportements distincts :

1. *Couverture réfléchissante*, elle renvoie vers l'absorbeur l'énergie qui aurait été perdue et reste froide.
2. *Couverture absorbante*, elle s'échauffe et réémet la chaleur sous forme des rayons infrarouges vers l'absorbeur.

La couverture devra donc jouer un rôle différent suivant les longueurs d'ondes considérées : elle devra être *sélective*.

I.2. Surfaces sélectives

Les principaux effets qui se produisent dans un capteur sont concentrés dans l'absorbeur. Une portion de l'énergie incidente est perdue par réflexion sur la couverture du capteur (si celle-ci existe) et sur la surface de l'absorbeur, ce qui constitue des pertes optiques. Une autre partie de l'énergie thermique générée par l'absorption des photons incidents est perdue par transfert vers l'environnement du capteur via convection, conduction et rayonnement, entraînant ainsi des pertes thermiques. Les pertes thermiques dues à la convection et à la conduction sont, en première approximation, proportionnelles à la température, tandis que les pertes thermiques par rayonnement sont proportionnelles à la puissance quatrième de la température, conformément à la loi de Stefan-Boltzmann.

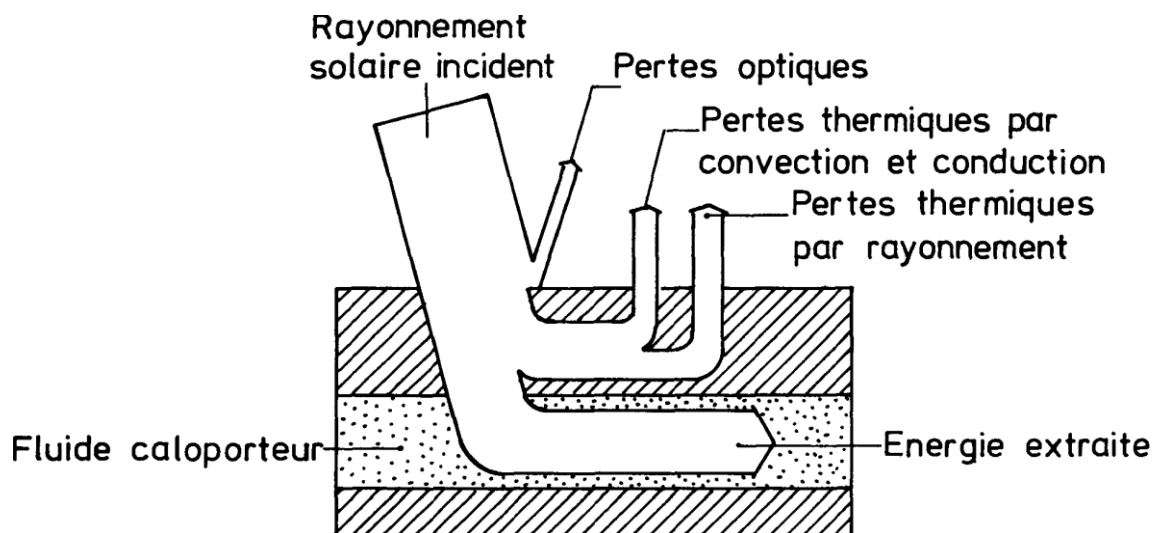


Figure I.3 : Pertes thermiques dans un capteur solaire

L'effet des pertes radiatives, plus intrinsèquement lié aux propriétés optiques des matériaux de l'absorbeur et du vitrage, devient plus important puis prépondérant aux moyennes puis aux hautes températures.

On peut alors augmenter le rendement en agissant sur les propriétés optiques des matériaux qui composent la couverture et la surface de l'absorbeur, afin de maintenir ou d'accroître l'absorption de l'énergie solaire incidente tout en réduisant simultanément les pertes radiatives à la température de fonctionnement.

Dès 1956, Tabor a recommandé l'utilisation de telles surfaces afin d'accroître le rendement des capteurs solaires. Lorsque le capteur comporte un vitrage disposé en avant de l'absorbeur proprement dit (afin de diminuer les pertes convectives et utiliser l'effet de serre) on peut envisager d'approcher ces conditions idéales de deux manières différentes : la première consiste à équiper le capteur d'un **absorbeur sélectif**. Une deuxième solution consiste à utiliser un **vitrage sélectif** [2].

I.2.1. Critères de choix d'une surface sélective :

➤ **Propriétés optiques :**

Seules l'absorptivité et l'émissivité spectrales pouvaient rendre compte dans le détail des propriétés optiques d'une surface sélective.

➤ **Stabilité physico-chimique :**

Il est essentiel que les propriétés optiques mentionnées précédemment restent stables ou subissent peu de dégradations durant l'utilisation du capteur. Cela nécessite que la surface sélective résiste à la température de fonctionnement, qu'elle ne soit pas affectée par des cycles thermiques variés, et qu'elle supporte des variations temporaires à sa température maximale

lors d'une interruption de circulation du fluide. Ces exigences peuvent causer des détériorations de la surface sélective. Un premier type de dégradation provient d'un écart excessif entre les coefficients de dilatation du substrat (généralement en cuivre, aluminium ou acier doux) et les matériaux de la surface sélective. Un second type est dû à la diffusion entre les couches : diffusion chimique ou par joints de grains, entraînant une détérioration rapide, surtout lorsque la sélectivité repose sur des interférences. Pour atténuer ce risque, des barrières de diffusion peuvent être insérées entre les couches actives optiquement, mais plus la structure pour obtenir la sélectivité est complexe, plus le risque d'interdiffusion augmente. Enfin, au-delà de leur stabilité thermique, les surfaces sélectives doivent être chimiquement inertes ou avoir une réaction très lente pour résister à divers types de corrosion, y compris l'oxydation à haute température et l'irradiation ultraviolette. Le risque d'attaque chimique durant le stockage avant utilisation doit également être pris en compte.

➤ **Coût de fabrication :**

Il est clair qu'un fabricant de capteurs ne trouvera une surface sélective rentable par rapport à un corps noir ou à d'autres surfaces sélectives que si la chaleur supplémentaire récoltée compense le coût additionnel. Cela dit, cet argument ne devrait pas dissuader la recherche de solutions potentiellement coûteuses, que ce soit en termes de matériaux ou de techniques de fabrication, car les avancées technologiques peuvent rendre ces solutions plus abordables à l'échelle industrielle. De plus, bien que la stabilité physico-chimique soit cruciale pour tout absorbeur, il n'est pas évident qu'un absorbeur sélectif stable soit significativement plus cher qu'un équivalent non sélectif stable. Actuellement, les matériaux peu coûteux associés à des méthodes de préparation économiques (comme la conversion chimique et le dépôt chimique en phase vapeur) suscitent le plus d'intérêt.

I.2.2. Différents types d'absorbeurs sélectifs

Il existe différents types d'absorbeurs sélectifs et la Figure ci-dessous résume les principaux types d'absorbeurs, qui vont être détaillés par la suite [2, 3].

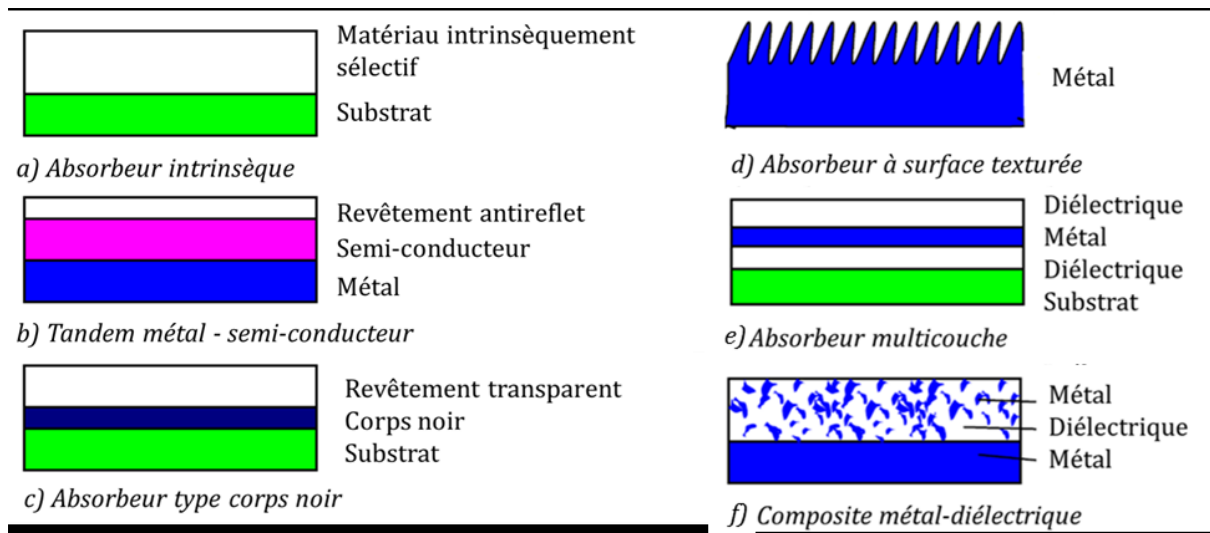


Figure I.4 : Principaux types d'absorbeurs

➤ **Les absorbeurs intrinsèques**

Un absorbeur intrinsèque c'est un matériau qui, par ses propriétés intrinsèques (notamment sa structure électronique) présente un comportement optique spectralement sélectif, déposé sur un substrat. Ce type d'absorbeurs est simple et stable, mais sa sélectivité optique est assez réduite. Ce type de propriétés se retrouve principalement chez les métaux de transition et les semi-conducteurs dopés spécifiquement pour améliorer leurs propriétés optiques. Des exemples de matériaux intrinsèquement sélectifs sont : le tungstène (W), le carbure d'hafnium (HfC) ou encore, le silicium dopé au bore. Le plus souvent, ces matériaux ne sont pas utilisés directement en tant qu'absorbeurs, mais sont utilisés comme composants dans les autres types d'absorbeurs au vu de leur bonne sélectivité. Certains, comme le carbure de zirconium (ZrC) sont employés directement comme absorbeur du fait de leur stabilité en température.

➤ **Les absorbeurs tandem métal – semi-conducteur**

Dans les absorbeurs tandem métal – semi-conducteur, l'absorption se fait dans la couche de semi-conducteur, du fait du gap du matériau, et le métal sert de réflecteur infrarouge. Une couche antireflet est nécessaire, car les semi-conducteurs utilisés pour ces applications ont un indice optique élevé qui va entraîner des pertes optiques par réflexion à la surface du semi-conducteur. Les semi-conducteurs requis pour cette application doivent avoir une bande interdite entre 0,5 et 1,26 eV. Des matériaux comme le silicium (Si), le germanium (Ge) et le sulfure de plomb (PbS) sont appropriés, avec des bandes interdites respectives de 1,1 eV, 0,7 eV et 0,4 eV. L'optimisation de ces absorbeurs nécessite des avancées dans les techniques de dépôt ou de croissance de couches semi-conductrices de qualité suffisante. Ces absorbeurs

posent aussi des problèmes liés à l'interdiffusion des matériaux du semi-conducteur et du réflecteur infrarouge.

➤ Les absorbeurs de type corps noir

Les absorbeurs de type corps noir sont composés d'une couche de matériau transparent, le plus souvent un semi-conducteur hautement dopé ($\text{SnO}_2:\text{F}$, $\text{SnO}_2:\text{Sb}$, $\text{In}_2\text{SO}_3:\text{Sn}$, ou $\text{ZnO}:\text{Al}$) recouvrant un matériau ayant des propriétés optiques et thermiques proches de celles d'un corps noir. Ce type d'absorbeur ne présente pas une très grande sélectivité du fait de l'émissivité du corps noir dans l'infrarouge. Cependant, du fait de sa simplicité de fabrication (par exemple par dépôt électrolytique d'oxyde de chrome) il est très utilisé pour les applications à basse température, comme les chauffe-eau solaires pour particuliers. Dans certains cas, des peintures noires spécialement conçues pour ces applications sont aussi utilisées, mais toujours à basse température et elles nécessitent de repeindre les tubes régulièrement.

➤ Les absorbeurs à surface texturée

La texturation de surface, est très utilisée pour réaliser des filtres optiques, dans tous les domaines de longueurs d'onde. En effet, selon la taille et la périodicité des structures présentes à la surface du matériau, les longueurs d'onde inférieures ou du même ordre de grandeur que la taille des motifs vont être absorbées. En revanche, pour les grandes longueurs d'onde, la surface se comportera comme un miroir. En adaptant la taille des motifs, il est donc possible de rendre une surface fortement sélective du point de vue optique.

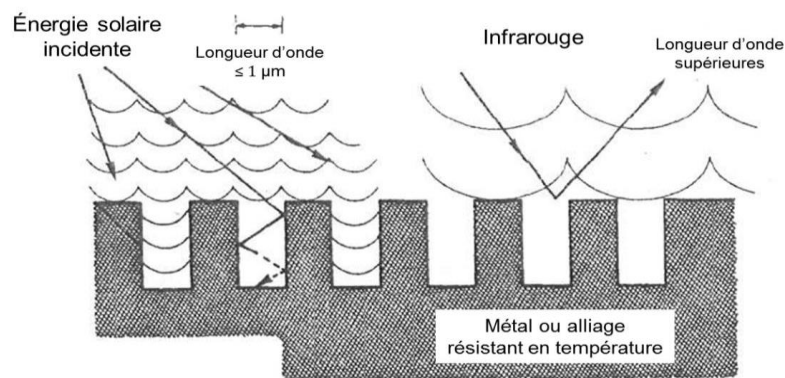


Figure I.5: Absorbeur à surface texturée

➤ Les absorbeurs multicouches

Les absorbeurs multicouches, utilisent les interférences causées par les couches pour absorber efficacement la lumière. L'un des premiers absorbeurs développés date de 1975 et a été conçu par Peterson et al. pour des applications spatiales, qui impliquent un fonctionnement à 860°C

et nécessitent une faible émissivité pour limiter les pertes à cette température. Cet absorbeur était un multicouche de type AMA pour Alumine/Métal/Alumine, avec du molybdène comme métal, et déposé sur un substrat de molybdène. Cet absorbeur est stable sous vide à 900°C pendant 500h. Cette stabilité est intéressante pour les applications CSP terrestres, mais un substrat en molybdène est trop onéreux pour une transposition directe aux centrales CSP.

➤ **Les absorbeurs composite métal-diélectrique**

Les composites métal-diélectrique, aussi appelés cermet pour composite céramique-métal, sont constitués de particules métalliques dans une matrice diélectrique, déposés sur un substrat métallique. La partie cermet absorbe fortement dans le visible, du fait des transitions inter-bandes dans les particules métalliques et de la résonnance entre les particules, mais reste transparente dans l'infrarouge. La couche métallique en dessous sert de réflecteur infrarouge.

I.2.3. Vitrages sélectives

Le vitrage permet de créer un effet de serre dans la couche d'air emprisonnée entre la vitre et l'absorbeur; ce qui permet d'améliorer le rendement du capteur, car le rayon infrarouge émis par l'absorbeur est piégé par la vitre qui est opaque (mais pas au rayonnement dans le domaine visible). Un vitrage efficace doit absorber au maximum et réfléchir au minimum le rayonnement peu importe son inclinaison; il doit aussi résister dans le temps aux effets de l'environnement (pluie, grêle, ...) et aux variations de températures [4].

Plusieurs études ont été réalisées dans le but d'optimiser le rendement des capteurs solaires. Parmi lesquelles, celles qui interviennent sur les performances thermiques et optiques de la couverture transparente. Plusieurs techniques utilisées ont permis d'apporter une amélioration notable sur le rendement thermique des dits capteurs [5].

➤ **Le verre à faible teneur en fer :**

Diminuer la quantité de fer dans un verre améliore la transmission de la lumière, réduit son absorption des rayonnements solaires et optimise ainsi l'efficacité thermique des collecteurs solaires. Des recherches ont révélé que les températures moyennes du verre classique sont supérieures à celles des verres à faible teneur en fer. Le flux de chaleur stationnaire transmis à travers la vitre, dans le cas du verre à faible teneur en fer, est plus élevé que celui obtenu pour la couverture en verre clair et par conséquent, le rendement instantané du système est plus élevé dans le cas d'une couverture en verre à faible teneur en fer.

➤ **Les couches poreuses de silice :**

L'utilisation de couches de silice poreuse comme revêtement antireflet permet d'augmenter la transmission lumineuse d'un verre de borosilicate à 550 nm, passant de 92 % à 97 % grâce à une couche poreuse de silice de 110 nm avec une porosité d'environ 35 %. La transmission lumineuse obtenue avec ce type de revêtement en SiO₂ poreux par le procédé sol-gel est supérieure à celle d'un verre ordinaire.

➤ **Verres nano-structurés :**

La nano-structuration est l'une des techniques qui permet d'améliorer la clarté du verre et ainsi d'augmenter sa transmissivité aux rayonnements lumineux. Le procédé de nano-structuration utilisé pour une vitre d'une cellule solaire a permis une amélioration des performances des cellules solaires en raison d'une augmentation de la transmissivité optique à travers le filet de verre nano-structuré. La mesure de la transmission des nanostructures de hauteur inférieure à 400 nm présente une augmentation de la transmission optique sur l'ensemble de la gamme spectrale de longueur d'onde allant de 300 nm à 800 nm. Le verre normal montre une transmissivité de 92% pour les grandes longueurs d'onde (450 nm-800 nm) et moins de 85% pour les petites longueurs d'onde (300 nm-350 nm). Des échantillons des nanostructures, de 10nm de hauteur, montrent une transmissivité de 95% sur la plupart de la gamme spectrale, ce qui représente une amélioration de 10% dans la gamme de courtes longueurs d'onde (350 nm-450 nm) et une amélioration de 3% dans la gamme des grandes longueurs d'onde. Cependant, toutes les nanostructures avec des hauteurs allant jusqu'à 400 nm montrent une amélioration dans la transmission optique.

➤ **Surface ondulée du collecteur:**

La conception de capteurs solaires adaptés qui conduit à augmenter le gain d'énergie utile et de réduire les pertes de chaleur, par le biais principalement de la face supérieure, est le principal sujet de nombreuses recherches qui recommandent l'utilisation des surfaces fines ou ondulées pour améliorer le rendement thermique des capteurs.

➤ **Vitrage à couvertures combinées (plastique-verre) :**

Il découle de l'analyse menée sur les capteurs à couverture combinée "plastique - verre" que les performances thermiques sont sensiblement meilleures que celles du capteur à double vitrage de même type, car la valeur du rendement optique ($\tau\alpha$) du premier capteur cité est

légèrement plus élevée que celle du second, et les pertes thermiques sont approximativement égales pour les deux capteurs. Néanmoins, le plastique a tendance à perdre ses caractéristiques optiques en vieillissant et en particulier quand ce dernier est exposé aux conditions environnementales extérieures.

Chapitre II : Fluide caloporteur et échangeurs

II. Fluide caloporteur et échangeurs

II.1. Fluide caloporteur :

De très nombreuses activités industrielles nécessitent le chauffage d'un produit à une température supérieure à la température ambiante. Différents modes de chauffage peuvent être identifiés [6]:

- le produit est chauffé directement par des gaz de combustion (fuel, gaz naturel), par des résistances électriques, par un chauffage inductif ou à micro-ondes.
- le produit est chauffé indirectement. Un circuit intermédiaire est, dans ce cas, disposé entre l'équipement thermique.

Le fluide circulant dans ce circuit intermédiaire peut jouer plusieurs rôles. Lorsque ce fluide effectue un simple transport de la chaleur, on le dit « caloporteur ».

Ainsi, le fluide caloporteur effectue un simple transport de la chaleur entre deux niveaux de température. Il est donc capable :

- d'emmagasiner l'énergie produite par une source de chaleur sous forme généralement de chaleur sensible (chauffage du fluide), mais également de chaleur latente (grâce à l'évaporation du fluide, comme cela est le cas en particulier dans un tube caloduc (BE 9545))
- de transmettre l'énergie thermique par contact direct avec le produit comme dans un four de cuisson ou par contact indirect grâce à un échangeur comme dans grand nombre de procédés industriels tels que les centrales électriques avec générateur de vapeur.
- de véhiculer cette énergie jusqu'à son point d'utilisation par circulation naturelle.
- **Exemples d'utilisation**

De nombreux exemples du domaine de la production d'énergie électrique peuvent illustrer l'utilisation de fluides caloporteurs : – dans un réacteur nucléaire de type PWR (Pressurized Water Reactor), la chaleur dégagée dans la grappe de crayons combustibles est évacuée grâce à un circuit d'eau pressurisée (ce fluide est alors désigné comme fluide caloporteur), puis transférée au fluide du circuit secondaire grâce à un générateur de vapeur. Ce fluide secondaire est vaporisé et détendu dans une turbine pour la production de l'énergie électrique. Le fluide secondaire (de l'eau, dans le cas des PWR) joue alors le rôle de fluide énergétique ; – dans une centrale thermique solaire, le fluide caloporteur [généralement une huile thermique

mais, dans quelques cas, des sels fondus (centrale Themis, par exemple)], porté à une température proche de 300 °C dans le capteur solaire (collecteur parabolique, par exemple), transmet la chaleur – au travers d’un générateur de vapeur – au fluide secondaire (de l’eau, dans ce cas). Ce fluide secondaire est vaporisé puis détendu pour permettre la production de travail mécanique et d’énergie électrique. Ce fluide joue également le rôle de fluide énergétique ; – l’usage de caloporteurs de type « métaux liquides » a été largement étudié pour les réacteurs nucléaires à neutrons rapides alors que les caloporteurs à sels fondus ont été utilisés dans certaines centrales solaires haute température ; – dans une centrale thermique, les gaz de combustion à des températures proches de 1 000 °C permettent la vaporisation – au travers des échangeurs récupérateurs – du fluide énergétique (également de l’eau) qui, après détente, permettra la production d’énergie mécanique et électrique. Dans ce cas particulier, il n’est pas fait usage de fluide caloporteur. De nombreux autres exemples relevant de la thermique industrielle peuvent illustrer aussi la diversité des fluides caloporteurs : – dans nombre de fours de cuisson (en particulier dans les applications alimentaires), l’air est chauffé au contact de résistances chauffantes, mis en mouvement grâce à un ventilateur puis mis en contact avec les produits alimentaires. L’air joue le rôle de fluide caloporteur ; Certaines applications très spécifiques, caractérisées par de très hautes températures de fonctionnement, peuvent faire appel à des métaux liquides ou des sels fondus comme fluides caloporteurs.

II.1.1. Principaux fluide caloporteurs

- Les fluides caloporteurs les plus courants sont, bien entendu, l’eau et l’air, de par leur provenance naturelle et leur quantité illimitée. L’air, comme tous les gaz, peut être utilisé à toutes températures, mais son emploi est limité par un coefficient de transmission thermique médiocre. L’eau en phase liquide ou vapeur est un fluide caloporteur courant dans l’emploi est fortement handicapée par sa pression de vapeur (15 bar à 200°C). eau et air présentent les atouts de forte stabilité, faible coût, grande sûreté d’utilisation (inflammabilité, non toxicité)
- Les fluides organiques possèdent une faible pression de vapeur et une température de congélation basse (toluène)
- Les sels fondus et les métaux liquides sont réservés aux hautes températures et leur utilisation nécessite des grandes précautions en termes de sécurité et de corrosion.

Fluide	Domaine usuel de température d'utilisation (°C)
Gaz (air, CO ₂ , He...)	Ambiant à 1 000
Vapeur d'eau	100 à 600
Eau	Ambiant à 200
Fluides organiques	Ambiant à 350
Sels fondus	150 à 500
Métaux liquides	200 à 700

Tableau II.1 : Température d'utilisation des fluides caloporteurs

II.2. Echangeur thermique

Les échangeurs de chaleur : Sont des dispositifs qui assurent l'échange de chaleur entre deux fluides à des températures différentes sans qu'ils soient mélangés [7, 8].

Au sein d'un échangeur de chaleur on peut trouver les modes d'échange suivants :

- Conduction : c'est la propagation de la chaleur dans la matière, sans transfert de masse. À travers les solides, la conduction assure un bon transfert de chaleur.
- Convection : ce mode de transfert de chaleur apparaît entre deux phases dont l'une au moins est mobile, en présence d'une différence de température. Le mouvement des phases peut être provoqué par des différences de densité dans le fluide, le transfert de chaleur est dit de convection naturelle ou libre. Le mouvement peut être provoqué par une dégradation d'énergie mécanique, le transfert de chaleur est dit de convection forcée. Cette dernière est essentielle pour ces appareils (échangeurs).
- Rayonnement : c'est l'émission d'énergie par les surfaces des corps sous forme de radiation. Elle correspond à un échange de chaleur par l'intermédiaires d'une onde de nature électromagnétique et qui ne nécessite aucun support matériel (cas du vide, certains gaz plus ou moins transparent et de certains solide).

Donc, le transfert de chaleur qui a lieu au sein d'un échangeur fait intervenir le mode convectif dans chacun des deux fluides et le mode conductif à travers la paroi qui les séparent. Généralement, le rayonnement est faible et sera négligé.

En général, Il existe trois classes d'échangeurs de chaleurs :

1. Échangeurs à transferts directs,

2. Échangeurs de stockage thermique,

3. Échangeurs à contacts directs.

II.2.1. Principe général

Le principe est de faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique. Ces fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi métallique ce qui favorise les échanges de chaleur. En général, le fluide chaud cède de la chaleur au fluide froid.

Le principal problème consiste à définir une surface d'échange suffisante entre les deux fluides pour transférer la quantité de chaleur nécessaire dans une configuration donnée. La quantité de chaleur transférée ne dépend pas seulement de la surface d'échange entre les deux fluides mais aussi de nombreux autres paramètres.

Les flux de chaleurs transférées dépendent aussi :

- des températures d'entrée, - des caractéristiques thermiques des fluides (chaleurs spécifiques, conductivité thermique), - des coefficients d'échange par convection.

II.2.2. Configurations géométriques

➤ Échangeurs tubulaires coaxiaux (simple)

Un des fluides circule dans l'espace annulaire entre les deux tubes tandis que l'autre circule dans le tube central. Pour cette configuration, deux types de fonctionnements sont distingués : les deux fluides circulent dans le même sens ou en sens opposé. Le premier est un échangeur co-courant (ou courant- parallèle). Dans le deuxième cas, c'est un échangeur contre-courant. Ce type d'échangeur est souvent rencontré dans l'industrie frigorifique en particulier pour les condenseurs à eau ou dans les groupes de production d'eau glacée.

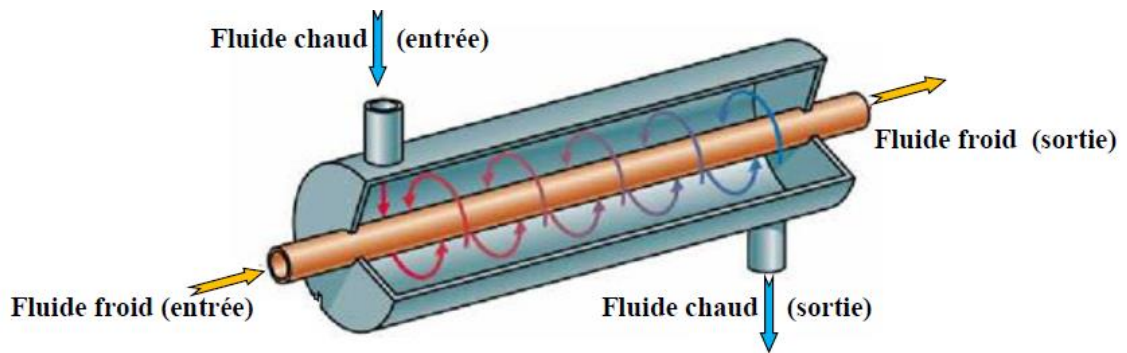


Figure II.1: Echangeur tubulaire simple

➤ **Échangeurs Tubes/Calandre (à faisceaux complexes)**

Dans ce type d'échangeurs, l'un des fluides circule dans le calandre autour de tubes qui le franchissent tandis que l'autre fluide circule à l'intérieur des tubes. Souvent, il est constitué d'un faisceau de tubes traversant un réservoir de manière longitudinale, appelé **échangeur multitubulaire**.

La circulation du fluide à travers les tubes est forcée par l'emplacement des parois, de manière à ce qu'il effectue un ou plusieurs aller-retours.

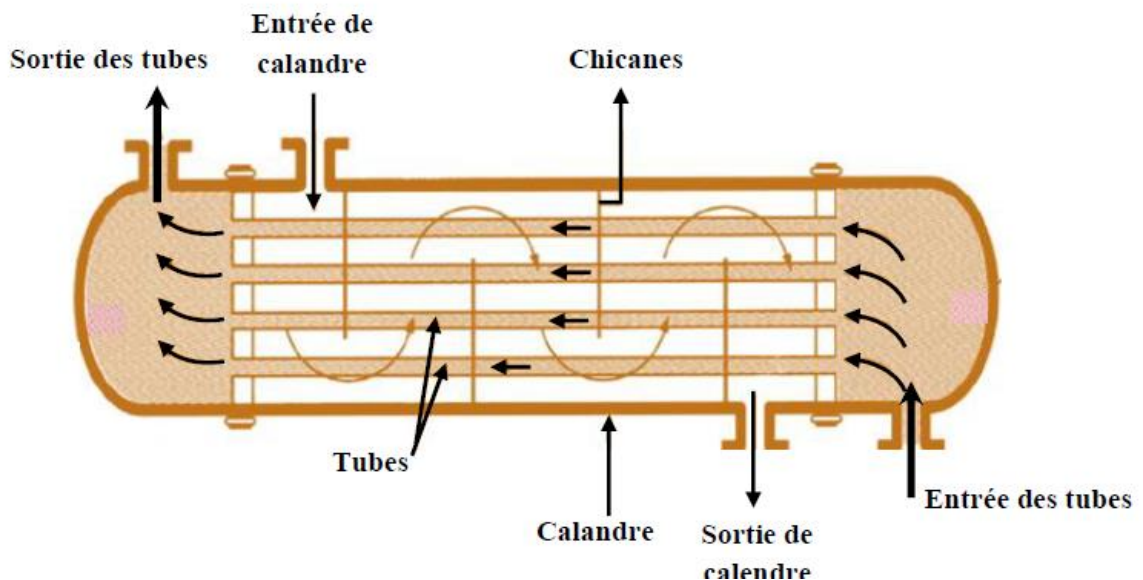


Figure II.2: Echangeur multitubulaire.

Ces échangeurs sont constitués soit d'un tube unique (serpentin), soit d'un faisceau de tubes branchés en parallèle enfermés dans une enveloppe appelée calandre.

➤ Échangeurs à courants croisés

Dans ce type d'échangeurs, une circulation de l'un des fluides dans une série de tubes alors que l'autre circule perpendiculairement autour des tubes. Généralement, c'est le liquide qui circule dans les tubes et le gaz à l'entour. Les tubes munis d'ailettes permettent un bon transfert de chaleur échangée en augmentant la surface d'échange. Le radiateur de refroidissement des véhicules à moteur est un exemple de cet échangeur.

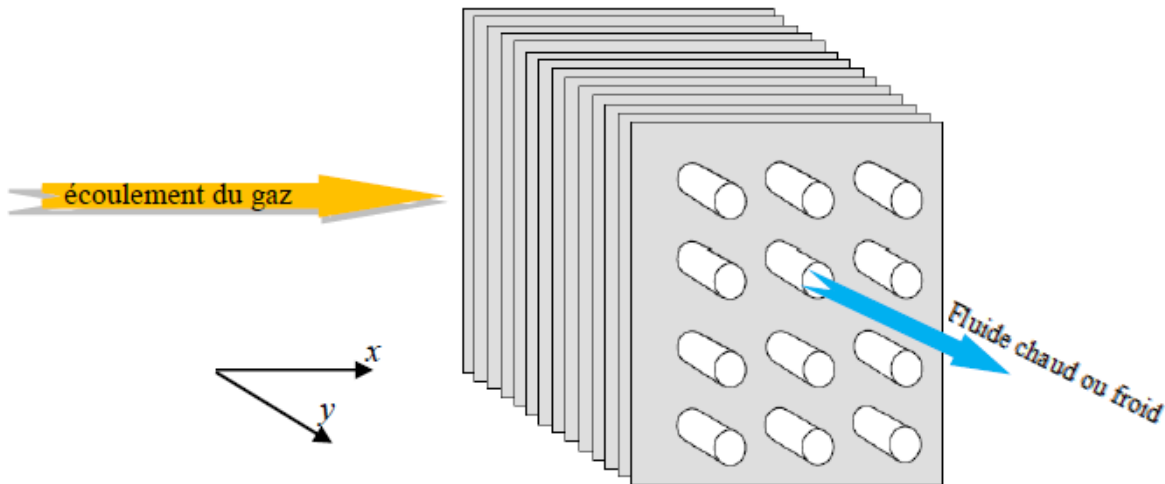


Figure II.3 : Echangeur à courants croisés

➤ Échangeurs à plaques

Ce type d'échangeurs est constitué de plaques assemblées de façon que le fluide puisse circuler entre elles. Un jeu de joints assure la distribution des fluides entre les plaques de telle sorte que chacun des deux fluides soit envoyé alternativement entre deux espaces inter plaques successifs.

Un échange thermique des fluides s'effectue à travers les plaques. La compacité avantage ce type d'échangeur. Ce dispositif permet une grande surface d'échange dans un volume limité. Donc, son utilité apparaît clairement lors des grandes puissances.

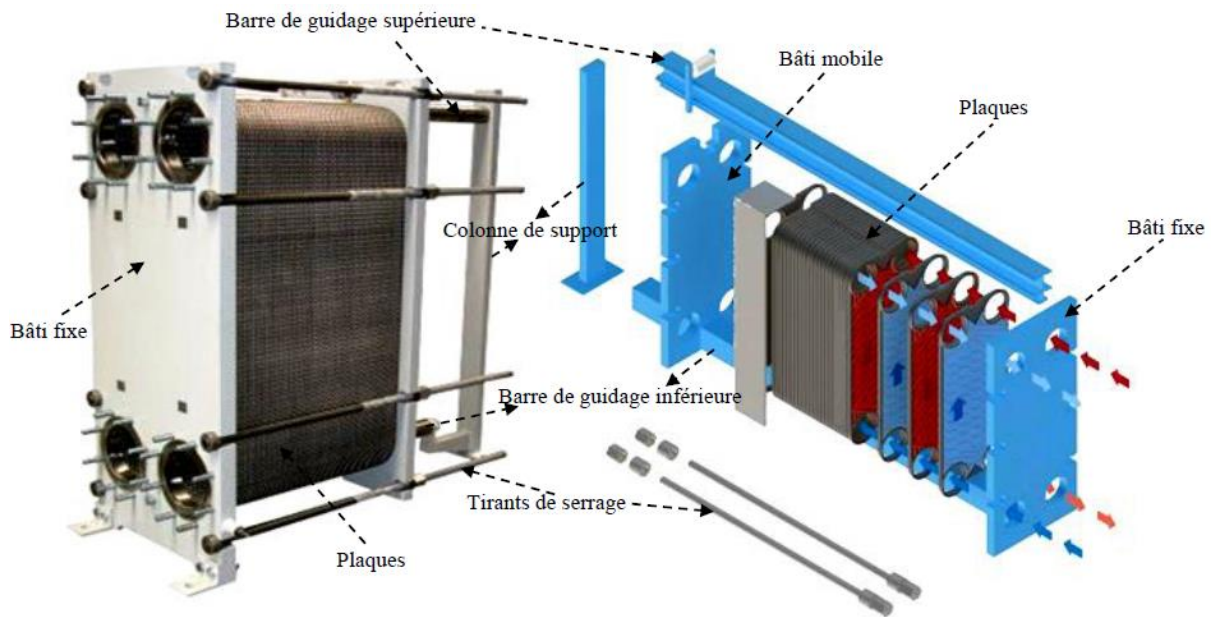


Figure II.4 : Echangeur à plaques

II.2.3. Étude d'un échangeur

Pour le refroidissement ou le chauffage des fluides, certains procédés nécessitent l'utilisation des fluides caloporteurs ou frigoporteurs intermédiaires.

Les paramètres nécessaires au dimensionnement d'un échangeur sont :

- La surface d'échange (surfaces des plaques, surface intérieure des tubes concentriques...) : **S en m²**
- Des caractéristiques de l'appareil (conductivité thermique, épaisseur des plaques) et du fluide (viscosité, régime laminaire ou turbulent,...) qui déterminent le coefficient global d'échange thermique **K en W/(m².°C) ou en W/(m².°K)**.
- L'écart de température d'une part et de la surface d'échange d'autre part, on utilise la moyenne logarithmique des écarts de température entre les extrémités de l'échangeur, notée **ΔT (°C)**

❖ Notations

Dans ce qui suit on utilise les hypothèses suivantes :

- Le régime est permanent : tous les paramètres et les variables sont constants dans le temps,
- L'échangeur est adiabatique,
- Les propriétés thermo-physiques des fluides restent constantes dans les intervalles de températures envisagés,
- Les températures sont monodimensionnelles et ne varient que dans une direction de

l'écoulement,

- Pas de pertes de pression (charge) au cours de l'écoulement.

➤ **Coefficient global d'échange thermique, K**

Déterminer un coefficient global de l'échange thermique, K constitue l'un des aspects incertains d'échangeur thermique. Cela provient de la dégradation continue de l'échangeur. Il est défini par la relation suivante :

La performance d'un échangeur de chaleur est évaluée principalement par sa conductance thermique globale. Cette dernière peut être calculée en se basant sur la géométrie, les propriétés de la paroi et les propriétés des deux fluides chaud et froid, les conditions de son fonctionnement (débits massiques et températures d'entrées des deux fluides).

La démarche de calcul est simple, mais elle est nécessaire. Elle permet aux étudiants de se familiariser aux calculs des échangeurs de chaleur.

$$d\phi = K(T_c - T_f)dS$$

Dans un échangeur de chaleur, le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid provient essentiellement de ces phénomènes :

- Convection entre le fluide chaud et la face externe de la paroi solide,
- Conduction à travers cette paroi solide,
- Convection entre la face interne de la paroi solide et le fluide froid.

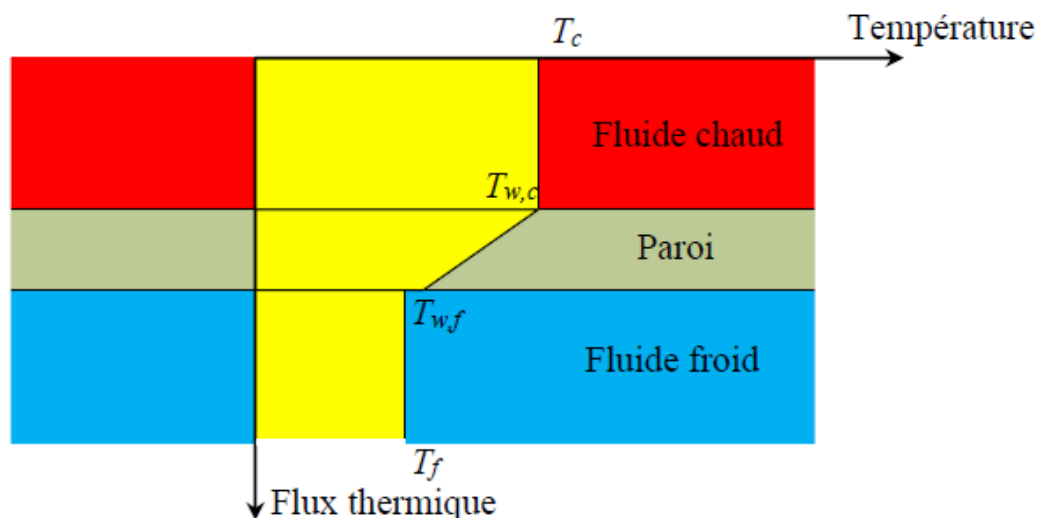


Figure II.5: Le profil de température à travers un élément de surface dS .

La résistance thermique convective du fluide chaud est $1/h_c S$ (h_c est le coefficient de convection du fluide chaud)

La résistance thermique convective du fluide froid est: $1/h_f S$ (h_f est le coefficient de convection du fluide froid)

La résistance thermique de conduction à travers la paroi solide d'épaisseur e et de conductivité thermique λ est $e/\lambda S$

L'expression de flux thermique transféré du fluide chaud au fluide froid est :

$$\phi = \frac{T_c - T_f}{\frac{1}{h_c S} + \frac{e}{\lambda S} + \frac{1}{h_f S}}$$

Ainsi on a:

$$\phi = KS(T_c - T_f) \Rightarrow K = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f}}$$

➤ Résistances d'encrassement, R

Les valeurs des résistances d'encrassement (Tableau II.2) sont déduites par des mesures comparatives entre les conditions de mise en service, puis le fonctionnement au cours du temps. Ces valeurs varient dans la gamme : $1 \times 10^{-4} - 70 \times 10^{-4} (m^2 \cdot ^\circ C) / W$

Fluides	Valeurs moyennes de \ddot{R} [$\text{m}^2\text{C}/\text{W}$]
Eau de mer à $T < 50^\circ\text{C}$	$9 \cdot 10^{-5}$
Eau de mer à $T > 50^\circ\text{C}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Eau de ville à $T < 50^\circ\text{C}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Eau de ville à $T > 50^\circ\text{C}$	$3.5 \cdot 10^{-4}$
Eau de rivière	$3.5 \text{ à } 7 \cdot 10^{-4}$
Vapeur d'eau non grasse	$9 \cdot 10^{-5}$
Vapeur d'eau grasse	$2 \cdot 10^{-4}$
Liquides réfrigérants	$1.8 \text{ à } 2 \cdot 10^{-4}$
Fioul	$4 \text{ à } 9 \cdot 10^{-4}$
Essence, kérosène, gas-oil	$2 \cdot 10^{-4}$
Huile de lubrification	$1.8 \cdot 10^{-4}$
Air non dépoussiéré	$3.5 \cdot 10^{-4}$
Air industrielle	$4 \cdot 10^{-4}$
Produits de combustion gazeux	$20 \text{ à } 70 \cdot 10^{-4}$
Vapeurs d'Alcool	$9 \cdot 10^{-5}$

Tableau II.2 : Valeurs de la résistance d'encrassement

➤ **Méthode DTLM (Moyenne logarithmique de la température)**

Il existe deux principaux types d'échangeurs tubulaires: l'échangeur à co-courant et l'échangeur à contre courant.

La minimisation de la surface d'échange et la perte de charge pour une puissance d'échange thermique donnée est l'objectif principal.

- **Echangeur à co-courant**

Si T_c et T_f sont les températures des deux fluides au droit de l'élément dS de la surface d'échange. Le flux thermique $d\phi$ échangé entre les deux fluides à travers dS peut s'écrire:

$$d\phi = K(T_c - T_f)dS \quad (1)$$

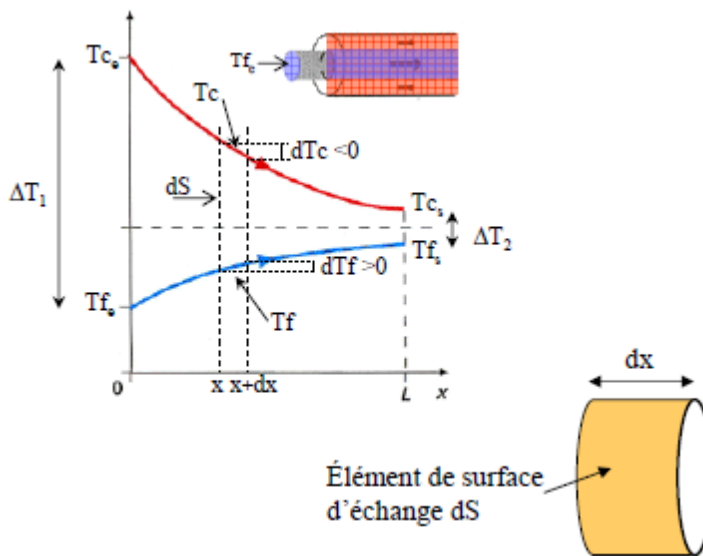


Figure II.6 : La variation de la température dans le cas à co-courant

Hypothèse : échangeur sans pertes, c'est-à-dire un échangeur dans lequel la chaleur cédée par le fluide chaud est intégralement transmise au fluide froid.

Dans ces conditions, le flux de chaleur $d\phi$ transmis du fluide chaud au fluide froid à travers l'élément dS s'écrira, dans le cas de l'échangeur à courants parallèles

$$d\phi = -\dot{m}_c C_{pc} dT_c = \dot{m}_f C_{pf} dT_f \quad (2)$$

Avec,

\dot{m}_c et \dot{m}_f sont les débits massiques respectifs des fluides chauds et froids, en kg/s.

C_{pc} et C_{pf} sont leurs chaleurs massiques à pression constante, en J/(kg.°C).

$$(2) \Rightarrow d(T_c - T_f) = -d\phi \left(\frac{1}{\dot{m}_c C_{pc}} + \frac{1}{\dot{m}_f C_{pf}} \right)$$

$$\frac{d(T_c - T_f)}{(T_c - T_f)} = -KdS \left(\frac{1}{\dot{m}_c C_{p,c}} + \frac{1}{\dot{m}_f C_{p,f}} \right)$$

Si le long de l'échangeur $K = \text{cte}$

L'expression d'où on tire finalement la puissance thermique totale échangée :

$$\phi = KS \frac{(T_{c,s} - T_{f,s}) - (T_{c,e} - T_{f,e})}{\ln \frac{T_{c,s} - T_{f,s}}{T_{c,e} - T_{f,e}}}$$

- **Echangeur à contre courant**

La variation de température dT_f du fluide froid quand on augmente la surface d'échange de dS , devient négative. Dans ces conditions, les relations (2) doivent s'écrire :

$$d\phi = -\dot{m}_c C_{p,c} dT_c = -\dot{m}_f C_{p,f} dT_f$$

La puissance thermique totale échangée :

$$\phi = KS \frac{(T_{c,e} - T_{f,s}) - (T_{c,s} - T_{f,e})}{\ln \frac{T_{c,e} - T_{f,s}}{T_{c,s} - T_{f,e}}}$$

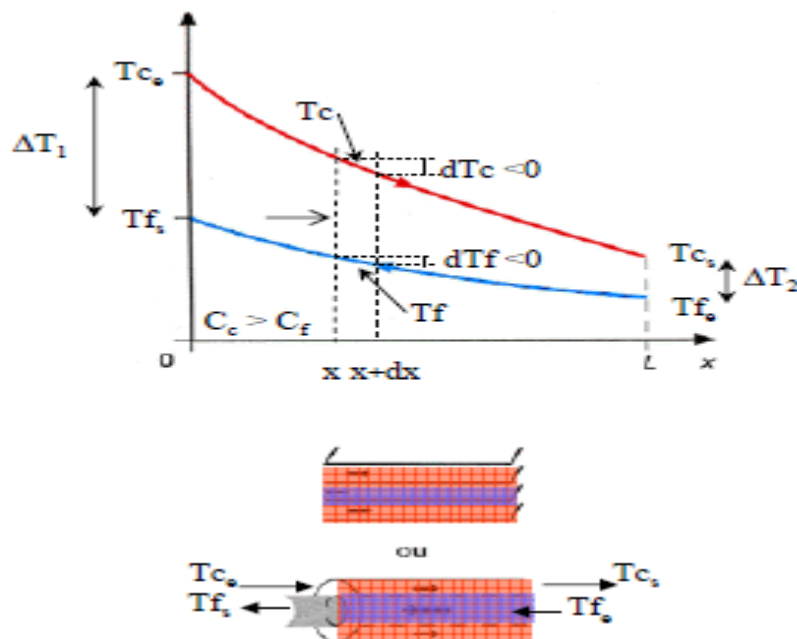


Figure II.7 : Les variations de températures le cas à contre-courant

Chapitre III : Capteurs photothermiques

III. Capteurs photothermiques

Les convertisseurs photothermiques sont des capteurs solaires conçu pour convertir l'énergie du rayonnement solaire capté par une surface que l'appelle surface absorbante en énergie calorifique, cette énergie est transférée à travers la paroi de la surface absorbante vers un fluide caloporteur (liquide ou gaz) pour l'exploiter. On peut diviser les convertisseurs photothermiques (capteur solaire) suivant [1] :

- Leur forme de construction (capteur plan et capteur concentrateur).
- Le niveau de température de fonctionnement qui varier entre 20 et 3000°C.

III.1. Capteurs plans:

Les capteurs solaires plans comprennent un caisson isolant au-dessus duquel est fixée une vitre en verre ou en plastique. À l'intérieur, une feuille métallique noire absorbe la chaleur du soleil emprisonnée dans le caisson. Cette chaleur est transmise à de l'air, de l'eau ou tout autre fluide caloporteur qui ne gèle pas. Le fluide circule librement ou dans des tuyaux vers le point d'utilisation [9]. Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150° C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil [10].

➤ Principe de fonctionnement :

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air,). Le schéma de Principe d'un capteur solaire plan est donné sur la figure III.1.

La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température ($T_{fs} - T_{fe}$) à la traversée du capteur [11].

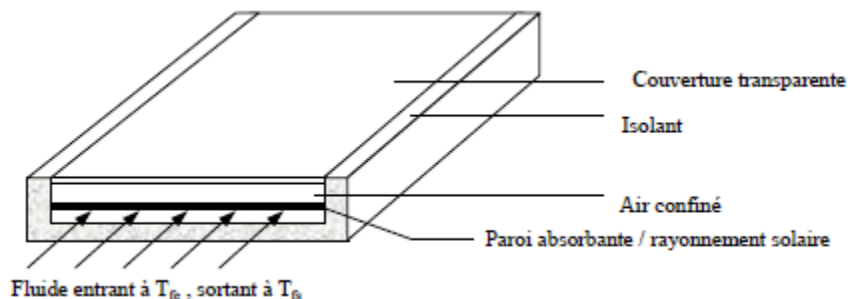


Figure III.1 : Principe d'un capteur solaire plan

➤ **Composantes d'un capteur plan :**

Un capteur plan est constitué essentiellement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique et d'un coffre.

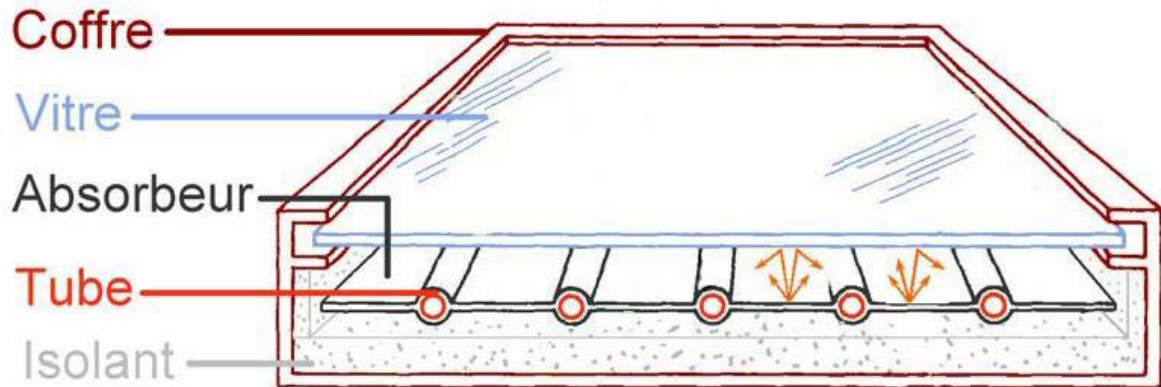


Figure III.2 : Composants d'un capteur solaire plan.

✓ **Vitrage:**

La vitre solaire avec une grande transmission lumineuse, optimise les rendements solaires et résiste aux intempéries [12, 13].

• **Pertes par rayonnement**

Les vitres utilisées dans les capteurs plans laissent passer le rayonnement solaire incident (fonction 1) avec un facteur de transmission τ très élevé (0.85), mais ils sont opaques au rayonnement infrarouge émis par l'absorbeur porté à la température de 35 à 100°C (longueur d'onde $>20 \mu\text{m}$).

C'est ce qu'on appelle **l'effet de serre**. La face interne de la couverture absorbe le rayonnement infrarouge, subit une augmentation de température et rayonne à son tour moitié vers l'extérieur, moitié vers l'absorbeur.

Au bilan thermique, les pertes par rayonnement sont diminuées de moitié. Il serait possible de réduire encore ces pertes en mettant plusieurs vitrages, mais en pratique on ne dépasse pas le double vitrage et cela pour deux raisons:

- Atténuation du facteur de transmission de l'énergie (pour le double vitrage, $\tau = 0.65$);
- Coût trop élevé.

- **Pertes par convection**

La couverture transparente limite également les pertes par convection. L'air est l'un des meilleurs isolants; on piège de l'air dans le polystyrène, sous réserve que la lame d'air n'ait pas une épaisseur supérieure à 3 cm, au-delà, des phénomènes convectifs interviennent. Dans la pratique, on adopte 3 cm entre l'absorbeur et la couverture, de façon à garder l'échange par conduction en considérant l'air immobile.

Pour limiter les pertes de couverture, on peut recouvrir la face interne de celle-ci d'une couche réfléchissante qui renvoie l'infrarouge venant de l'absorbeur.

- ✓ **L'absorbeur :**

Feuille métallique noire qui capte la chaleur du rayonnement solaire, il assure deux fonction: absorber la plus grande partie du rayonnement solaire possible, transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec un minimum de pertes. L'absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes : un bon coefficient d'absorption, une bonne conductivité thermique et une bonne résistance à la corrosion. Le choix du matériau et le mode de construction à une grande influence sur la qualité du capteur.

Du fait de leurs conductivités élevées, les absorbeurs son généralement en cuivre, en acier ou en aluminium.

- ✓ **Fluide caloporteur**

- **Entrée du caloporteur**

Le caloporteur froid s'écoule dans les tubes de circulation pour absorber l'énergie solaire piégée dans le capteur.

- **Sortie du caloporteur**

Le caloporteur qui sort du capteur à une température élevée (pouvant atteindre 80 °C environ), est stocké ou utilisé immédiatement.

- ✓ **L'isolation thermique arrière et latérale**

Les isolants utilisés sont de la laine de verre ou de la mousse polyuréthane de 4 à 8 cm. Les propriétés des isolants les plus utilisés sont : la laine de roche, laine de verre, Polyuréthane, Polystyrène, liège expansé.

- ✓ **Le coffre du capteur**

C'est une structure sous forme de cadre qui consolide l'ensemble

➤ **Paramètres et caractéristiques d'un capteur**

Les différents paramètres et caractéristiques à considérer pour le fonctionnement des capteurs solaires suivants sont [14]:

- ✓ **Paramètres externes** : On ne citera que les paramètres d'ensoleillement les plus importants qui sont le flux global et la durée d'insolation obtenus par des relevés météorologiques à travers tout le territoire.
- ✓ **Paramètres internes** : Parmi ces paramètres, on peut citer : paramètres géométriques, paramètre de position (inclinaison et orientation du capteur).

Paramètres de fonctionnement Ces paramètres sont : la température d'entrée du fluide caloporteur dans le capteur, le débit du fluide caloporteur et la température des différentes parties du capteur.

➤ **Les caractéristiques de fonctionnement** : Ces caractéristiques nous permettent d'effectuer un choix parmi les différents types des capteurs à savoir :

- La température du fluide soutiré du réservoir (destiné à l'utilisation).
- Le rendement du capteur.
- La puissance thermique du capteur

III.1.1. Types des capteurs solaires plans

➤ **Les capteurs plans non-vitrés:**

Dans ces capteurs, l'eau circule dans un absorbeur, généralement noir, ouvert à l'air. Ces capteurs ne sont pas isothermes, ils conviennent mieux à des applications à basse température, où la température désirée est inférieure à 30°C.

Les capteurs plans sans vitrage sont habituellement fabriqués par un plastique noir qui a été stabilisé afin de résister aux rayons ultraviolets, comme ces capteurs ne possèdent pas de vitrage, une grande partie de l'énergie solaire est absorbée. Cependant, parce qu'ils ne sont pas isothermes, une grande partie de la chaleur absorbée est perdue lorsqu'il y a du vent et lorsque la température extérieure n'est pas assez chaude [11].

par exemple les capteurs moquette, d'une structure très simple réseau de tubes plastiques noirs, utilisés essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines, en été , ou les capteurs non-vitrés à revêtement sélectif, à irrigation totale, en acier inoxydable, utilisés essentiellement pour le préchauffage d'eau chaude sanitaire, le chauffage basse température plancher chauffant et le chauffage des piscines.

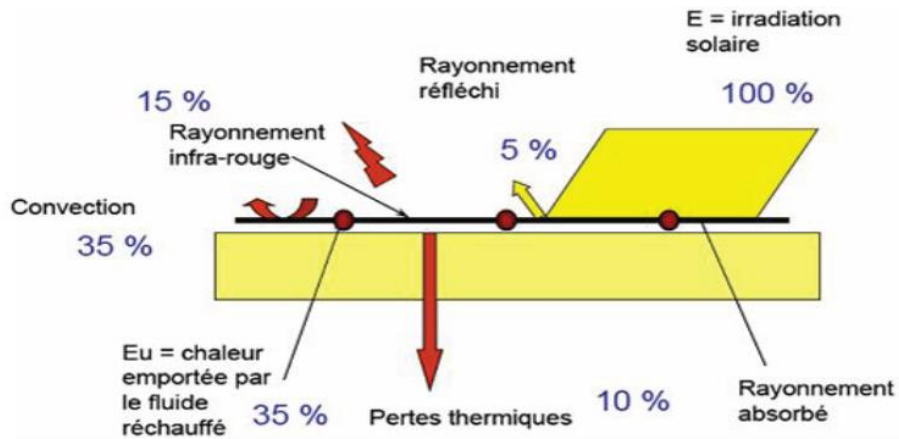


Figure III.3: Principe de fonctionnement des capteurs plans sans vitrage

➤ **Les capteurs plans vitrés:**

Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où la température désirée se situe entre 30 et 70 °C.

Dans ce type de capteur, l'absorbeur plan transforme les rayons solaires en chaleur. Afin de réduire au minimum la perte de chaleur, l'absorbeur est situé entre vitrage (vitre plane ou matériau transparent) et un panneau isolant[15].

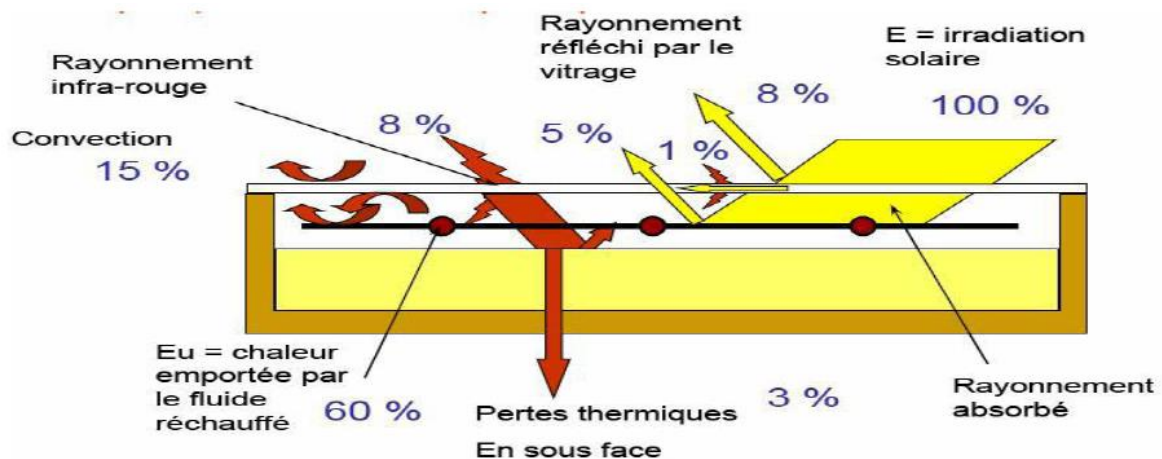


Figure III.4: Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés.

Le capteur solaire à plan vitré est le type de capteur solaire thermique le plus répandu. Il utilise l'**effet de serre** pour capter l'énergie thermique du soleil. Ils sont composés généralement d'un châssis sous forme de coffre, d'un isolant en fond, d'un absorbeur de

couleur noire en tubes de cuivre munis d'ailettes dans lequel circule le fluide caloporteur et d'une vitre.

III.2. Les collecteurs à tubes sous vide:

Ils se présentent sous la forme d'un panneau où sont alignés des tubes de verre transparents sous vide, un des meilleurs isolants thermiques. Dans chaque tube, un absorbeur capte la chaleur solaire et un échangeur la transmet à un fluide caloporteur. Comme avec les autres capteurs, le fluide va alors circuler vers les points d'utilisation. Grâce à des déperditions de chaleur très faibles, la température peut s'élever jusqu'à 100-140 °C. Ces capteurs sont adaptés aux applications industrielles nécessitant de hautes températures (nettoyage d'abattoirs, pasteurisation de conserves, etc.)[16].

Un capteur solaire thermique sous vide est composé: d'une série des tubes de verre sous vide, d'un absorbeur à l'intérieur de tube de verre et d'un tube en cuivre à l'intérieur de tube de verre. Les tubes en cuivre sont parcourus par un fluide caloporteur. Ce dernier se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes, la figure ci-dessous montre le fonctionnement d'un capteur sous vide (type caloduc).

Remarque :

Un fluide caloporteur circule dans plusieurs tubes à double paroi sous vide, qui leur garantissent une très bonne isolation thermique. Le vide étant le meilleur isolant connu.

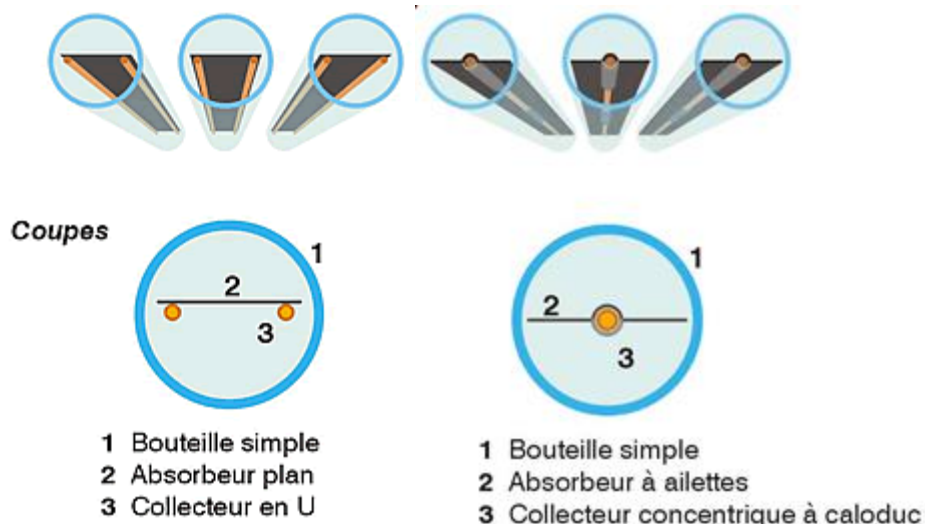


Figure III.5 : Capteur solaire thermique sous vide

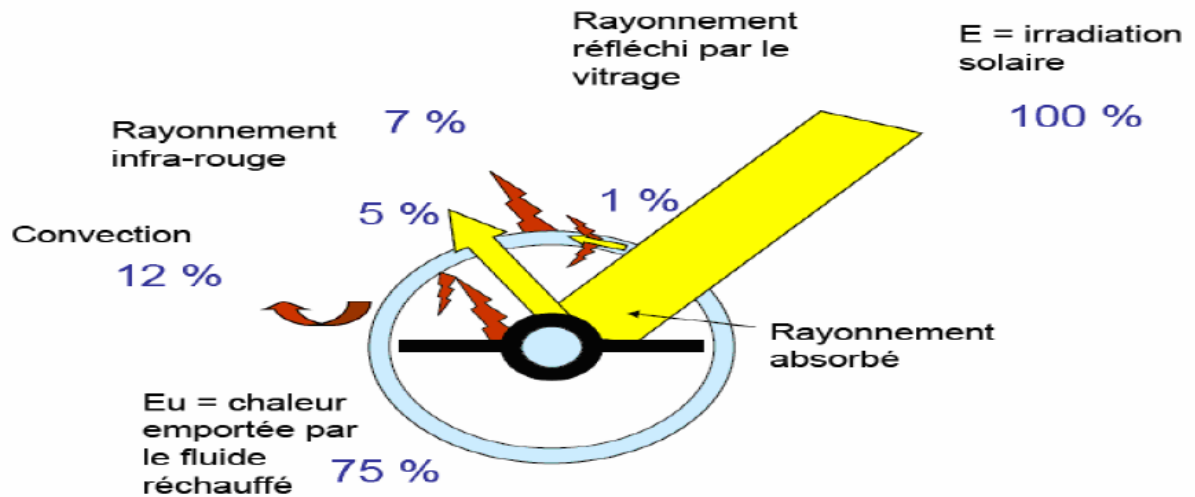


Figure III.6 : Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide caloduc.

III.3. Les capteurs concentrateurs :

Le capteur solaire concentrateur réfléchit et focalise le rayonnement solaire reçu directement sur l'absorbeur de manière à accroître l'intensité des rayons solaires. Par conséquent, l'usage de ce type de capteur permet d'obtenir des températures supérieures à celles que peut réaliser le capteur plan. On distingue deux types de concentration [17] :

- 1) Les systèmes qui peuvent concentrer le rayonnement autour d'une ligne appelés concentration linéaire ou concentrateurs à deux dimensions.
- 2) Les systèmes pouvant concentrer la lumière autour d'un point, appelés concentrateurs ponctuels ou concentrateurs à trois dimensions. Ces systèmes présentent une symétrie de révolution autour d'un axe.

Les systèmes à concentration présentent un certain nombre d'inconvénients :

- Les pertes optiques peuvent être importantes; elles sont dues aux phénomènes de réflexion et de réfraction et aux caractéristiques géométriques du système ;
- Le rayonnement diffus est très mal utilisé dans les systèmes à forte concentration, seul le rayonnement direct est concentré ;
- Les systèmes à forte concentration nécessitent des montages optiques précis et par conséquent relativement chers ;
- Il faut aussi maintenir les qualités optiques du système (contre l'oxydation,) ;
- Dans la plupart des cas, le flux n'est pas distribué de façon uniforme sur l'absorbeur ;
- L'absorbeur est soumis à de grandes variations de température lors des passages nuageux ;

- Les systèmes à forte concentration ont un champ étroit. Il est donc nécessaire de pointer pour capter le rayonnement direct et ceci demande des mécanismes d'orientation.

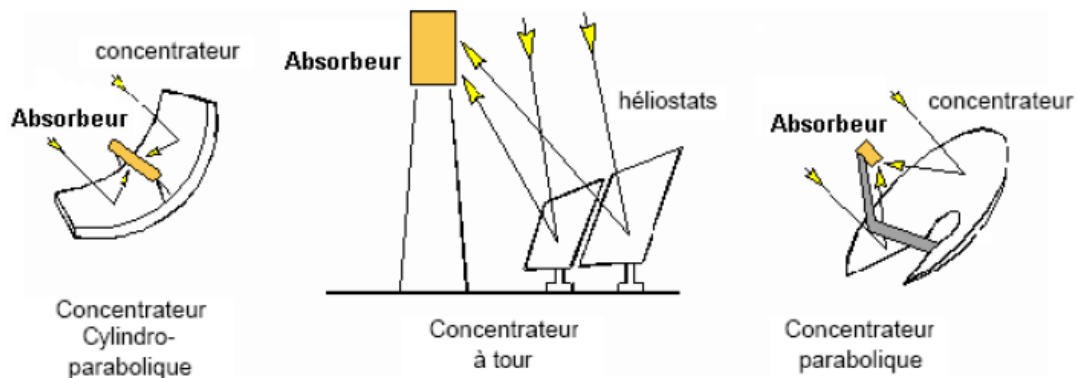


Figure III.7: Exemples des capteurs solaires concentrateurs

III.4. Bilan thermique d'un capteur solaire plan

Le bilan thermique de la paroi absorbante s'écrit [13, 18, 19]:

$$\varphi_{sa} = \varphi_p + \varphi_u + \varphi_{st} \quad (\text{en W})$$

Où :

φ_{sa} : Flux solaire absorbé

φ_p : Flux perdu par la paroi absorbante

φ_u : Flux utile transmis au fluide caloporteur (ou P_u)

φ_{st} (P_{st}): Flux stocké dans le capteur qui s'écrit :

$$\varphi_{st} = M_e c_{eau} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{en W})$$

Où M_e : Masse en eau du capteur définie par : $\sum m_i c_i = M_e c_{eau}$; i représente les différents

éléments constitutifs du capteur

T : Température moyenne du capteur

t : Temps

La puissance absorbée par le capteur s'écrit :

$$\varphi_{sa} = \tau_{cs} \times \alpha_{ps} \times E^* \times S \quad (\text{en W})$$

Où :

φ_{sa} : Flux solaire absorbé par la surface exposée (W)

E^* : densité de flux solaire incident sur le capteur ($W.m^{-2}$)

α_{ps} : Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire

τ_{cs} : Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire

S : Surface de la paroi absorbante.

Dans le cas où le fluide caloporteur ne subit pas de changement d'état, le flux utile s'écrit :

$$\varphi_u = \dot{m} \times C \times (T_{fs} - T_{fe}) \quad (\text{en W})$$

Où :

\dot{m} : Débit massique du fluide caloporteur

C : Capacité calorifique du fluide caloporteur

T_{fs} : Température d'entrée du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur

T_{fe} : Température de sortie du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme :

$$\varphi_p = h_p \times (T_{pm} - T_a) S \quad (\text{en W})$$

Où :

h_p : Coefficient global de pertes du capteur

T_{pm} : Température moyenne de la paroi absorbante

T_a : Température de l'air extérieur

Dans le cas d'un capteur plan, la température moyenne T_{pm} peut en première approximation être calculée par :

$$T_{pm} = \frac{3T_{fs} + T_{fe}}{4} + \Delta T \quad (\text{en } ^\circ\text{C})$$

Pour tenir compte de la non-linéarité de l'évolution de la température du fluide dans le capteur et de l'écart de température ΔT existant entre le fluide et la paroi absorbante.

III.5. Rendements d'un capteur solaire

Les rendements d'un capteur sont définis par rapport au flux solaire incident de la manière suivante :

- Le rendement global :

$$\eta = \frac{\varphi_u}{E^* \times S}$$

- Le rendement interne :

$$\eta_i = \frac{\varphi_u}{\varphi_{sa}}$$

- Le rendement optique :

$$\eta_o = \frac{\varphi_{sa}}{E^* \times S}$$

Chapitre IV :
**Convertisseurs photothermiques aux basses et
aux moyennes températures**

Plusieurs catégories d'applications des convertisseurs photothermiques se dégagent en fonction des niveaux des températures, on peut distinguer dans la catégorie des convertisseurs aux basses températures :

IV.1. Cloche de jardinier

Le principe de fonctionnement se base sur le phénomène de l'effet de serre. Une surface transparente vitrée ou en plastique (pour permettre le passage des rayons incidents) piège l'énergie thermique remise sous forme des rayons infrarouges, ce qui augmente la température de l'enceinte [1].

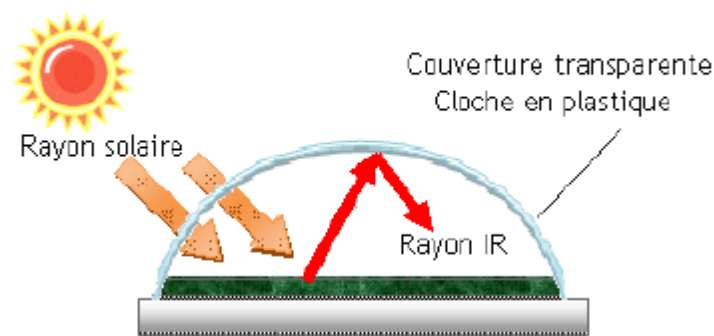


Figure IV.1: Cloche de jardinier

L'effet de serre permet d'obtenir des températures moyennes de plus de 20°C même par temps froid.

IV. 2. Capteur à air

Sous un vitrage une plaque noire exposée aux rayons solaires s'échauffe d'autant plus qu'un isolant arrête les pertes arrière de chaleur. A cause de la différence de température entre l'ambient et l'intérieur du capteur l'air circule entre le verre et la tôle noire (Absorbeur) et s'échauffe.

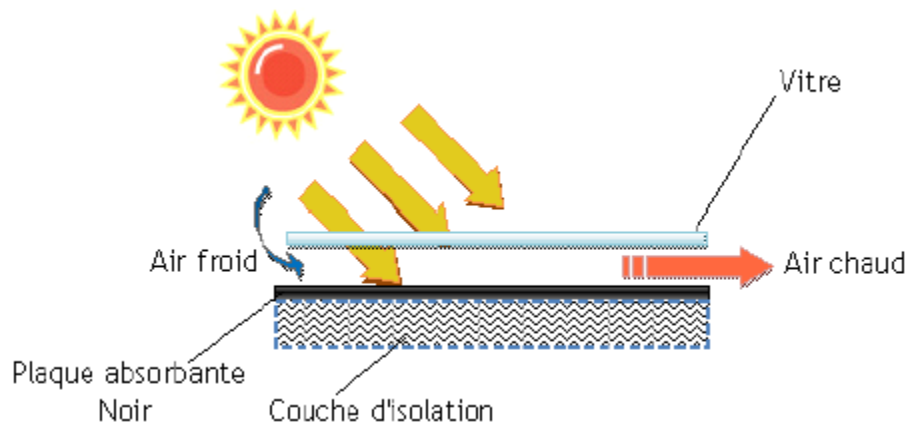


Figure IV.2 : Capteurs à air

L'échauffement de l'air peut atteindre 20 à 40°C de plus que la température ambiante, le rendement du capteur est de l'ordre de 40 à 50 % en fonction des dimensions du capteur.

Applications:

✓ **Le séchage agricole :**

Le but du séchage est de déshydrater un produit de façon à abaisser sa teneur en eau en-dessous d'une valeur permettant sa conservation à température ambiante. Le séchage a donc pour effet d'alléger le produit. Il provoque également des modifications d'aspect, de goût, de texture et de qualité nutritionnelle du produit. Le fonctionnement du séchoir dépendra directement de la quantité d'irradiation et de l'humidité du lieu d'utilisation. Il est possible de classer les séchoirs solaires en plusieurs catégories en considérant deux caractéristiques [18]:

- Un séchoir est dit couvert si l'absorbeur est protégé par une couverture transparente, il est dit non couvert dans le cas contraire.
- Un séchoir est dit à direct si le rayonnement solaire atteint directement les produits, indirect si les produits sont à l'abri du rayonnement solaire.
- Un séchoir est dit à convection naturelle si la circulation d'air est assurée par thermosiphon, ventilé si elle est assurée par une action mécanique.

✓ **L'habitat solaire par utilisation de l'air chaud**

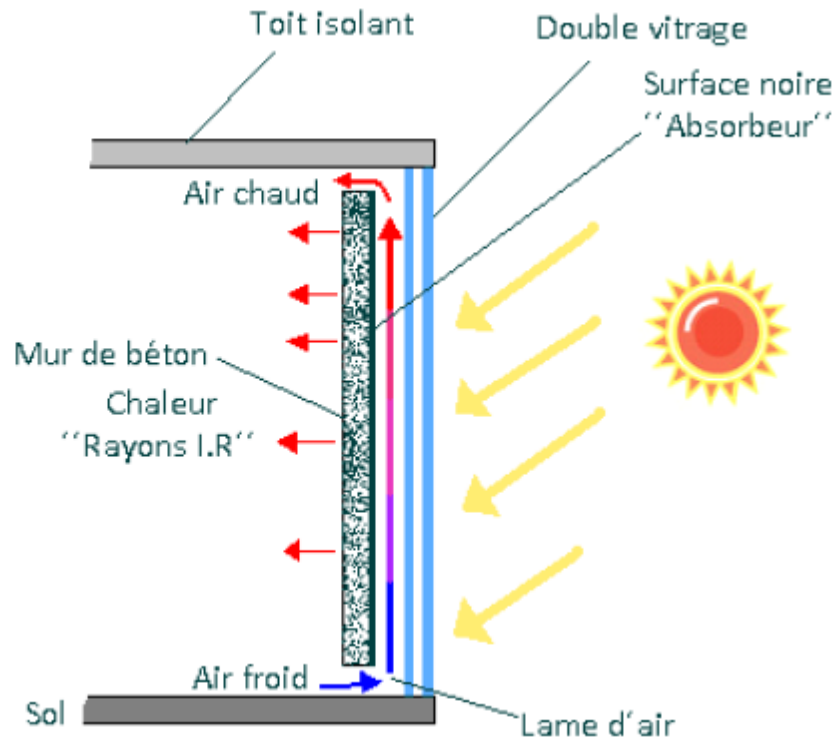


Figure IV.3 : Mure Trombe Michel

IV.3. Distillateur solaire

La distillation solaire est une technique qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer de l'eau saumâtre dans un bac couvert par une vitre inclinée. L'eau salée dans le bac va se chauffer (d'autant plus vite que le bassin est noir) et avec l'augmentation de température une partie de l'eau s'évapore et la vapeur d'eau se liquéfie sur la surface intérieure de la vitre transparente [20].

Éventuellement des gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface de la vitre et tomber dans le récupérateur situé au coin. Il faut régulièrement nettoyer le bassin pour éliminer le sel, voir la figure ci-dessous (Figure IV.4).

Applications [1] :

- Alimentation en eau potable a partie de l'eau de mer : quelques m³ /jour pour les hôtels, dispensaires etc.
- Eau distillée pour les garages ou l'industrie

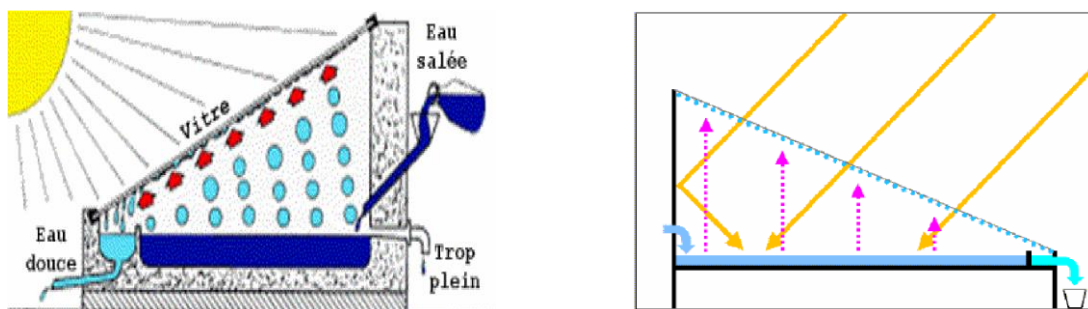


Figure IV.4: Principe de construction et de fonctionnement d'un distillateur solaire simple

IV.3.1. Types de distillations solaires

Les procédés de dessalement par distillation utilisant l'énergie solaire sous forme thermique sont : distillation solaire à effet de serre et distillation solaire à multiples effets [20].

➤ Distillation solaire à effet de serre

Soit une serre fermée et exposée au soleil à l'intérieure de laquelle se trouve une lame d'eau de mer ou d'eau saumâtre de quelques centimètres d'épaisseur. L'air à l'intérieur de la serre est surchauffé et saturé de vapeur d'eau (douce) qui se condense au contact de la paroi en verre relativement froide. Les gouttes d'eau douce peuvent être recueillies en bas du vitrage dans une gouttière par exemple (Figure 9).

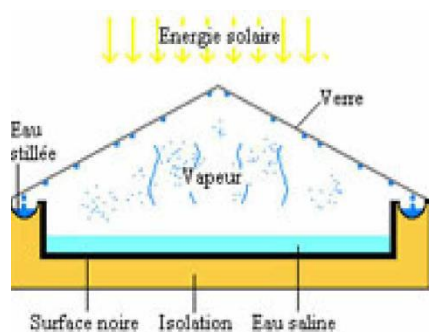


Figure IV.5: présentent le principe et l'exemple d'un distillateur solaire à effet de serre

➤ Distillation solaire à multiples effets

Ce procédé consiste à un ensemble d'effets successives où la vapeur produite dans un effet est utilisée pour chauffer l'eau de l'effet suivant en s'y condensant, l'apport thermique initial est

fourni à l'effet de tête (bouilleur). De part sa simplicité et sa souplesse de fonctionnement, ce procédé est le mieux disposé à s'adapter à l'énergie solaire. Cette adaptation peut se faire :

- soit avec des capteurs solaires plans pour les petites unités allant jusqu'à plusieurs m³/jour.
- soit avec des capteurs à concentration pour des capacités plus importantes.

Un stockage thermique est souvent utilisé, sous forme de réserve d'eau chaude, pour permettre d'avoir une certaine autonomie de fonctionnement en régime permanent ou intermittent.

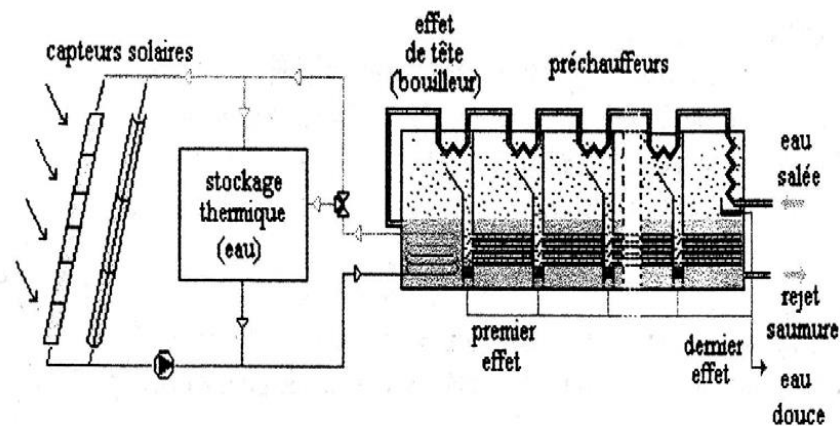


Figure IV.6: Schéma d'une installation de dessalement par
Multiples effets accouplés à des capteurs solaires

IV.3.2. Caractéristiques du distillateur

- **L'efficacité globale :** η_g (%) donnée par la relation :

$$\eta_g = \frac{Q_{ev}}{E^* \times S} = \frac{\dot{m}_d \cdot L_{fg}}{E^* \times S}$$

\dot{m}_d : Débit du distillat.

E^* : Puissance solaire incidente.

L_{fg} : Chaleur latente d'évaporation de l'eau.

S : Superficie du capteur (air de la vitre)

Q_{ev} : Puissance d'évaporation

- **L'efficacité interne :** η_i (%)

Si l'efficacité globale est le rapport de l'énergie de la quantité d'eau produite à l'énergie solaire tombant sur une surface horizontale, elle ne fait pas mention de la quantité d'énergie entrant réellement dans le distillateur, d'autant plus qu'un distillateur est construit en général pour un lieu donné et avec une pente de couverture fixe. Un changement de pente et de localité variera la quantité d'énergie pénétrant dans le distillateur. On définit donc une efficacité dite interne qui tient compte de tous ces paramètres et qui est définie par :

$$\eta_i = \frac{Q_{ev}}{Q_{eau}}$$

La quantité de chaleur absorbée par l'eau dépend de l'angle d'incidence du rayonnement d'incident par rapport à la vitre. On trouvera dans le tableau 2 les coefficients moyens globaux de réflexion, d'absorption, de transmission d'une vitre de 6 mm d'épaisseur, d'une nappe d'eau ($e \approx 15$ mm) et du fond du distillateur.

Pour une intensité globale E^* , l'expression de Q_{eau} est :

$$Q_{eau} = (\tau_v \cdot \alpha_e + \tau_v \cdot \tau_e \cdot \alpha_f) \cdot E^* \cdot S$$

$$\alpha_t = \tau_v \cdot \alpha_e + \tau_v \cdot \tau_e \cdot \alpha_f$$

Avec :

τ_v : Coefficient de transmission du vitre ;

τ_e : Coefficient de transmission de l'eau ;

α_e : coefficient d'absorption de l'eau ;

α_f : Coefficient d'absorption du fond de distillateur ;

α_t : Coefficient d'absorption fictif du distillateur ;

E^* : Puissance solaire incidente.

Q_{eau} : Puissance absorbée par l'eau distillée.

IV.3.3. Bilans énergétiques dans un distillateur simple

- **Echanges de chaleur à l'intérieur du distillateur**
- **Echange de chaleur de l'eau entre l'absorbeur et la surface de condensation**

L'eau reçoit de l'absorbeur un flux solaire ou de chaleur par convection naturelle et conduction.

L'eau cède un flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle aux surfaces de condensation. Puisque il existe une évaporation, l'eau perd un flux de chaleur.

➤ **Echange de chaleur entre la vitre et la surface d'eau**

Les flux solaires incidents cédés par la nappe d'eau ne sont pas reçus intégralement par la surface de condensation à cet égard au cours du transfert une partie est absorbée par l'atmosphère interne et les parois latérales.

Les vitres reçoivent les flux incidents par convection naturelle, par rayonnement et par condensation de la vapeur d'eau.

➤ **Echange de chaleur entre la vitre et l'ambiant**

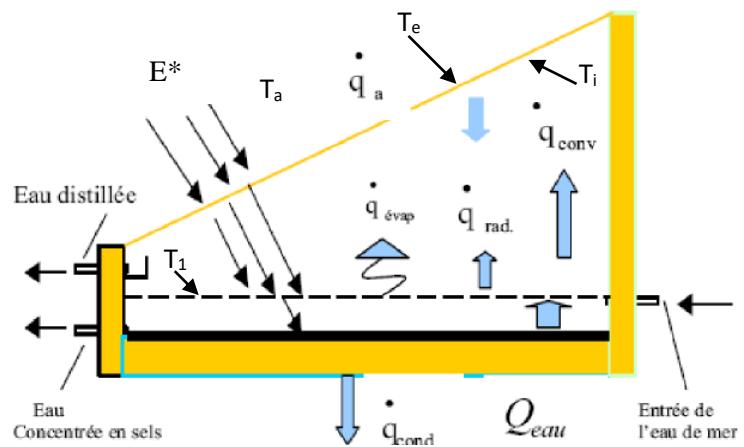
Le milieu extérieur fournit un flux de chaleur par rayonnement solaire à la vitre, dont une partie est réfléchiée.

La vitre cède au milieu extérieur un flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle.

Modélisation mathématique

La figure illustre les différents échanges de chaleur qui se produisent dans un distillateur solaire. Pour un régime permanent, la chaleur absorbée par les parois est négligeable par rapport à celle reçue par la masse d'eau.

Les équations régissant le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur, s'écrivent comme suit



Bilan thermique de la masse d'eau

$$\dot{q}_r + \dot{q}_c + \dot{q}_e + \dot{m}_d C_e (T_1 - T_a) = \alpha_t S E^*$$

$\dot{q}_r + \dot{q}_c + \dot{q}_e$: Quantités de chaleur perdues, par rayonnement, convection, évaporation, par la masse d'eau par unité de temps.

$\dot{m}_d C_e (T_1 - T_a)$: Chaleur perdue par addition d'eau d'appoint supposée à température T_a et de chaleur massique C_e .

La quantité de chaleur perdue évaporation est donnée par : $\dot{q}_e = \dot{m}_d L(T_1)$

Bilan thermique de la vitre

La quantité de chaleur reçue par la vitre est évacuée par conduction à travers celle-ci, la chaleur traversant la vitre est transmise ensuite au milieu extérieur soit :

$$\dot{q}_r + \dot{q}_c + \dot{q}_e = \frac{\lambda_v}{e} (T_i - T_e) S = h_c (T_e - T_a) S + h_r (T_e - T_a) S$$

λ_v : conductivité thermique de la vitre ;

e : épaisseur de la vitre ;

h_c, h_r : coefficients d'échange par convection et rayonnement entre la vitre et l'extérieur.

IV.4. Les capteurs à eau (sans vitrage)

Ces capteurs sont composés d'un simple absorbeur constitué d'un réseau de tubes accolés soit en plastique soit en caoutchouc de couleur noire. L'eau à chauffer circule dans les tubes. La température pouvant être atteinte (sans vent) environ 45°C. Le rendement est de l'ordre de 30% [1].

Applications :

- Préchauffage des eaux sanitaire dans les centrales de chauffe.
- Chauffage des piscines

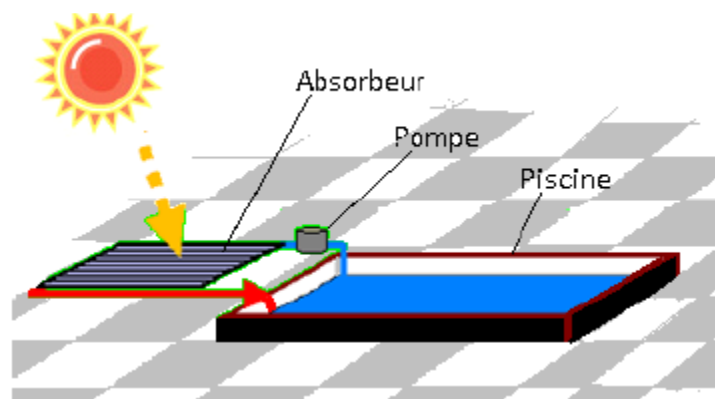


Figure IV.7: Chauffage des piscines

Il est à remarquer qu'à ce niveau thermique le stockage de l'eau chaude est très efficace.

IV.5. Tour solaire

L'air qui se trouve entre le sol (Absorbeur) et le verre (Couverture) d'abord chauffé par une surface de captage solaire formée d'une couverture transparente et agissant comme une serre. L'air chaud étant plus léger, il s'échappe par une grande cheminée centrale. La différence de température entre la partie basse et la partie haute de la cheminée donne lieu à un déplacement

perpétuel de l'air (convection naturelle). Cette circulation d'air permet alors à des turbines situés à l'entrée de la cheminée de produire de l'électricité [21].

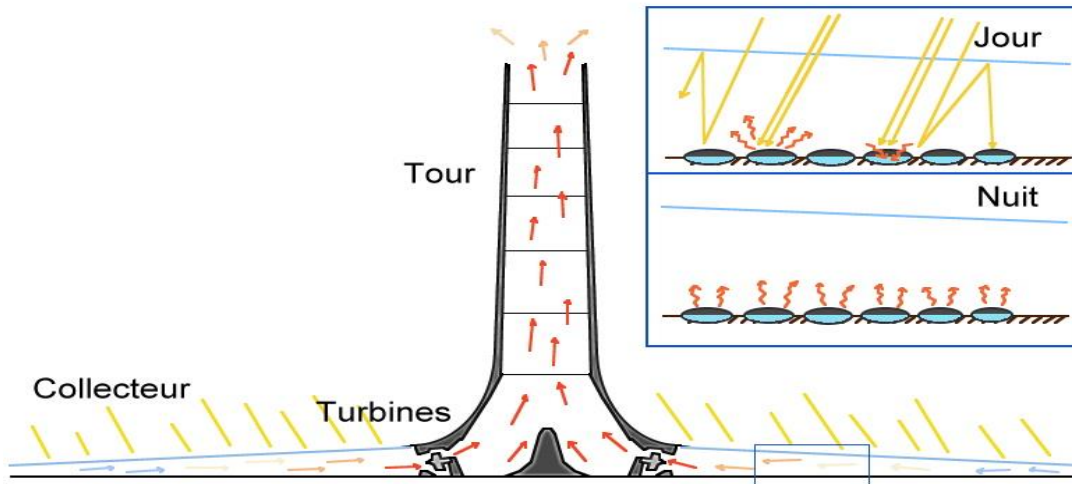


Figure IV.8: Tour solaire

Au centre de la serre la température peut atteindre 30°C supérieure à celle de l'extérieur. Le rendement de ce type d'installation est directement proportionnel à la hauteur du cheminée, à la surface du collecteur de chaleur et à l'ensoleillement direct. Théoriquement l'électricité produite peut atteindre 200 MW.

Application: [10]

- Actuellement cette machine utilisée seulement pour produire de l'électricité.
- Premier prototype au sud Madrid de l'Espagne délivré en pointe 50KW.
- Australie cinq fois plus grand que celle de l'Espagne : Hauteur du cheminée 1000 m, Surface du collecteur solaire 40 Km², Capacité environ 200 MW.

IV.6. Les capteurs vitrés

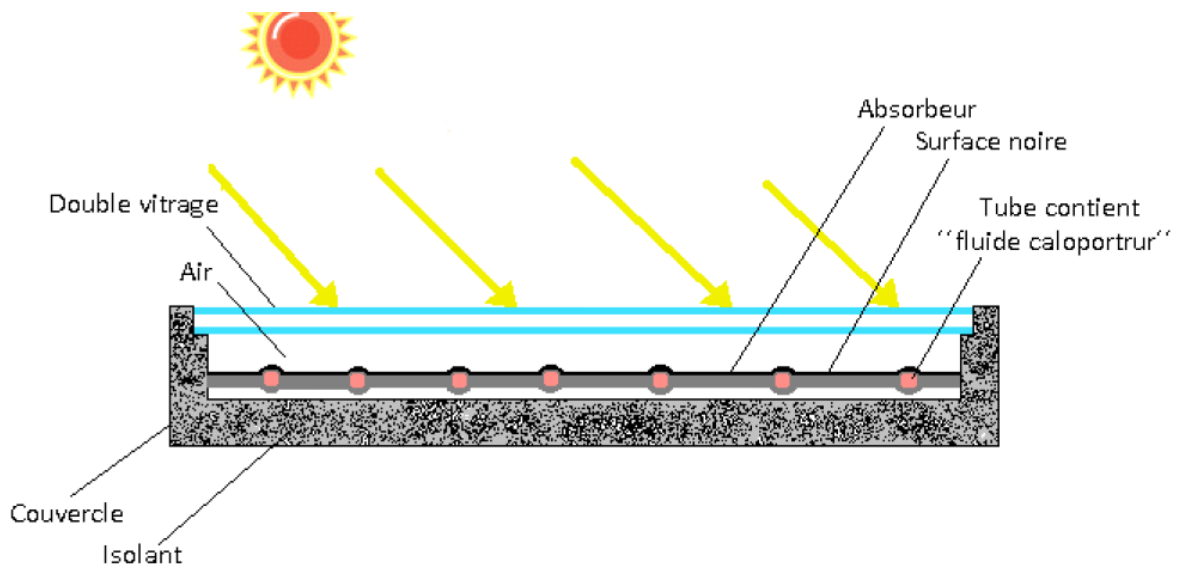


Figure IV.9 : Capteur plan avec couverture "Double vitrage".

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre III, dans ce type de capteur on utilise l'effet de serre associé à une bonne isolation thermique de l'élément chauffant. Le capteur est constitué :

- D'un élément chauffant (Absorbeur) métallique comprenant des tubes à eau ou une lame d'eau comprise entre 2 plaques ; la partie supérieure est noire
- Au-dessus on dispose un ou deux vitres.
- Sur les côtés et en dessous un isolant (laine de verre, polyuréthane, etc.).
- Le tout est enfermé dans un boîtier rigide.

On peut augmenter la température en utilisant des revêtements sélectifs au niveau de l'absorbeur. Par exemple un capteur de rendement 50 % avec une bonne isolation on atteint une température de l'ordre de 65°C sans revêtement sélectif et 95°C avec revêtement sélectif.

Les capteurs solaires vitrés ont plusieurs applications, à savoir [22] :

IV.6.1. Production d'eau chaude

La production d'eau chaude sanitaire est à l'heure actuelle l'application la plus développée de l'énergie solaire thermique. Sous un climat tropical sec, un chauffe-eau solaire performant et bien dimensionné peut permettre de satisfaire les besoins en eau chaude d'une famille toute l'année. Sous un climat tropical humide, il sera nécessaire à certaines périodes d'utiliser une

énergie d'appoint. Le chauffe-eau solaire permettra quand même de réaliser d'importantes économies. Il existe plusieurs types de chauffe-eau :

- **Chauffe-eau solaire capteur-stockeur**

Ce sont des appareils qui se présentent comme des capteurs solaires à eau classiques avec coffre, vitrage, isolant et absorbeur. La contenance de l'absorbeur, de l'ordre de 75 l.m^{-2} permet d'assurer dans le même appareil les fonctions de captage et de stockage de l'énergie. Ces appareils sont peu encombrants, peu coûteux et faciles à installer. Ils présentent un bon rendement lors des journées ensoleillées (résistance thermique négligeable entre l'absorbeur et l'eau : contact sur toute la surface de l'absorbeur). Cependant les pertes de chaleur sont importantes la nuit et la température de l'eau le matin en période fraîche (décembre, janvier en climat tropical sec) est souvent trop bas. Des modèles de fabrication locale bien isolés ont été testés et donnent des résultats satisfaisants. Le problème principal à résoudre est la réalisation d'un capteur plat d'une épaisseur de l'ordre de 5 mm résistant à la pression d'eau du réseau.

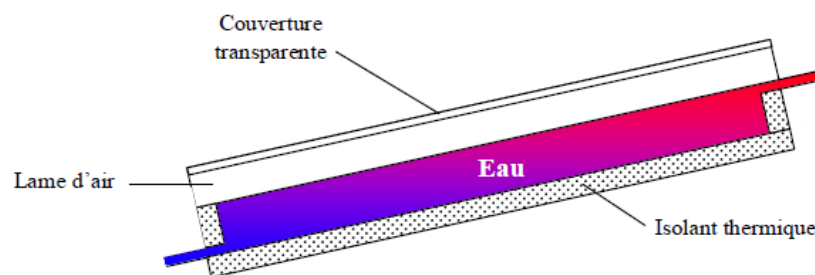


Figure IV.10 : Chauffe-eau solaire capteur-stockeur

- **Chauffe-eau solaire monobloc**

Il s'agit d'appareils dont le ballon de stockage d'eau chaude est solidaire du capteur solaire, la circulation d'eau entre les deux éléments s'effectuant par thermosiphon. Pour un bon fonctionnement de ces appareils, les règles suivantes doivent être respectées :

- Eviter les possibilités d'accumulation d'air en un point haut du circuit
- Placer les tubes en parallèle pour éviter les pertes de charge
- Le bas du réservoir doit être situé au-dessus du capteur
- Respecter une inclinaison minimale ($>10^\circ$, on choisit souvent 30°) pour un fonctionnement correct du thermosiphon

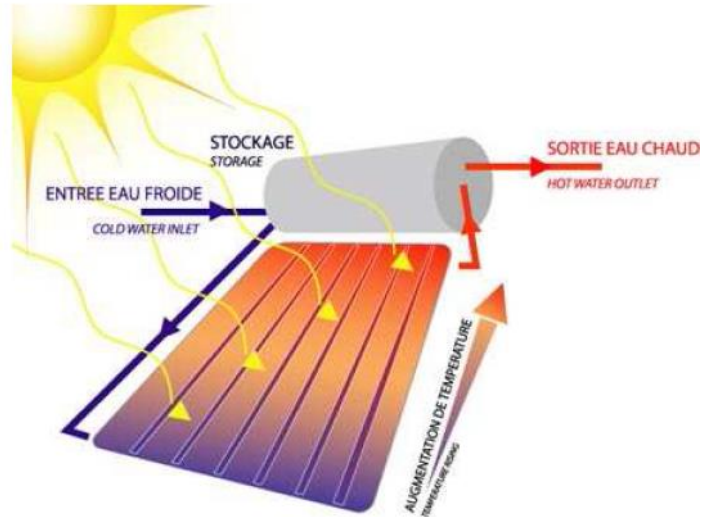


Figure IV.11 : Chauffe-eau solaire monobloc

- **Chauffe-eau solaire à éléments séparés**

Ces appareils sont constitués d'un ballon relié à un ou plusieurs capteurs par des tuyauteries de longueur variable. Le ballon non solidaire du capteur peut être installé à l'intérieur du logement. Ils fonctionnent le plus souvent en convection forcée (circulation de l'eau assurée par une pompe) ce qui nécessite le raccordement au réseau électrique. D'une plus grande souplesse d'utilisation, leur bon fonctionnement est davantage tributaire du soin apporté à leur installation.

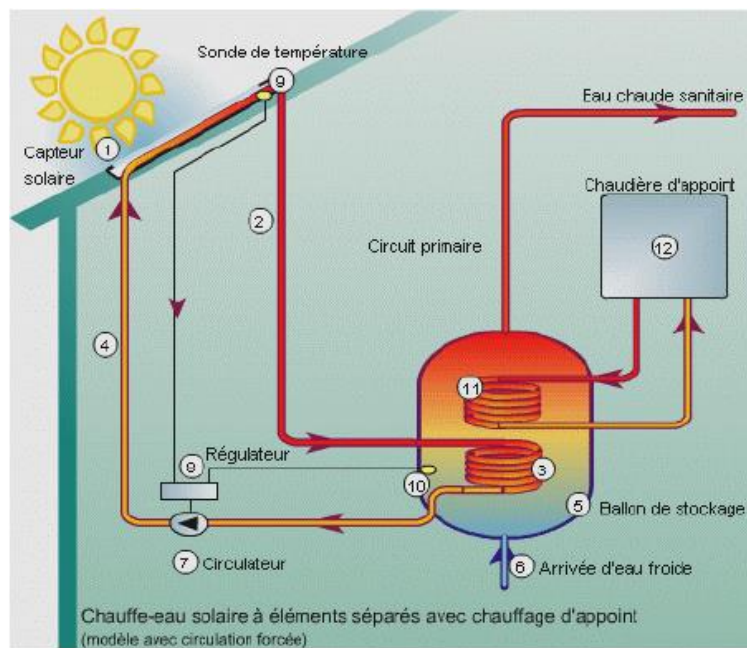


Figure IV.12: Chauffe-eau solaire à éléments séparés

IV.6.2. Chauffage des habitations

Le principe consiste à distribuer la chaleur provenant des capteurs solaires dans des radiateurs de grande surface ou dans un plancher chauffant (bâtiment neuf), le chauffage des locaux étant réalisé dans les deux cas en basse température. Ces systèmes de chauffage doivent recourir à un appoint puisque l'on ne couvre jamais 100 % des besoins de chauffage. Il existe essentiellement deux types d'installations (Figure IV.13, Figure IV.14).

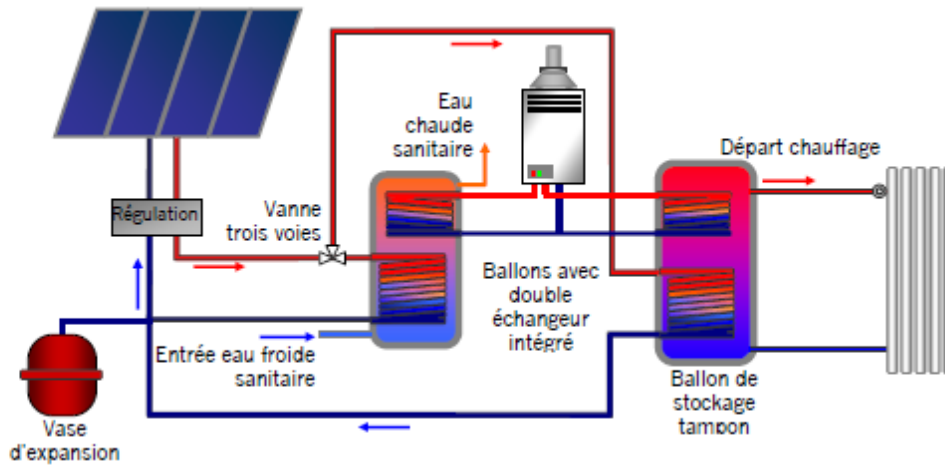


Figure IV.13 : Schéma de principe du chauffage solaire avec tampon

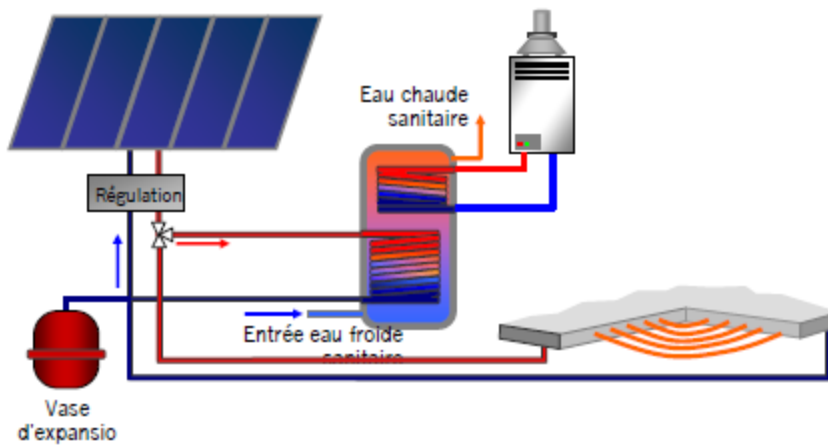


Figure IV.14 : Schéma de principe d'une installation solaire avec chauffage direct

IV.6.3. Climatisation

La climatisation solaire désigne l'ensemble des systèmes utilisant l'énergie solaire comme ressource énergétique primaire afin de refroidir un bâtiment [23, 24].

En théorie, il existe quatre moyens de produire du froid à partir de la ressource énergétique du soleil [25]:

- Utiliser les panneaux solaires photovoltaïque pour produire de l'électricité afin d'alimenter une climatisation traditionnelle. Cela demande une grande surface de capteurs et c'est gâcher cette électricité.
- Convertir l'énergie solaire thermique en énergie mécanique couplée avec un climatiseur à compression.
- Utiliser l'énergie solaire thermique pour alimenter une machine à froid dite à « sorption » (absorption ou adsorption).
- Utiliser l'énergie solaire thermique pour alimenter un système de conditionnement d'air par évaporation ou DEC (Dessicant Evaporative Cooling).

La technique de climatisation solaire la plus courante utilise des capteurs solaires pour fournir de la chaleur à un dispositif à « *absorption* ». Ce dispositif dissocie par ébullition une solution d'eau et de bromure de lithium.

Après refroidissement, la recombinaison des deux composants produit du froid qui est distribué dans un système de climatisation classique dans le bâtiment.

En effet, les machines frigorifiques à absorption utilisant le cycle $H_2O-LiBr$ nécessitent une source chaude dont la température doit être égale au moins à $75^{\circ}C$. Cette exigence implique que les capteurs solaires requis, puissent produire un fluide à haute température avec un minimum de pertes thermiques. La plupart du temps, des capteurs plans à surface sélective ou bien des capteurs sous vide bien adaptés à ce type d'application

Le refroidisseur à absorption est donc composé essentiellement de: • un bouilleur • un condenseur • un détendeur • un évaporateur et une ou deux pompes pour les transferts de solution ainsi que la tuyauterie et la régulation (voir la figure IV.15).

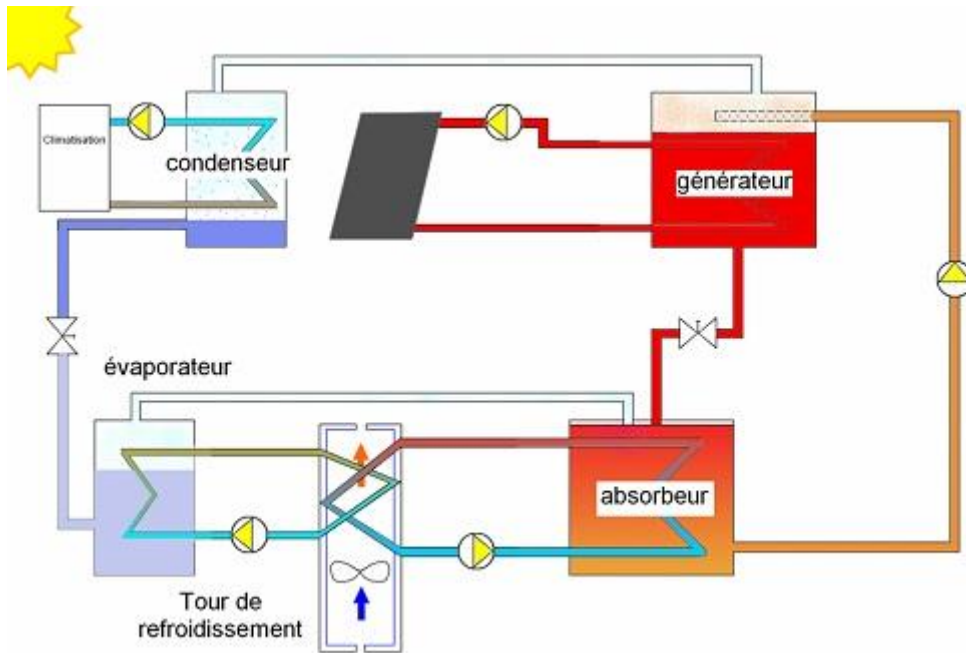


Figure IV.15: Principe de fonctionnement de la climatisation solaire à absorption

Principe de base :

La méthode de réfrigération par absorption utilise un cycle purement thermique qui repose sur des différences d'affinités entre deux corps, suivant leurs conditions thermodynamiques: pression, température, concentration. L'absorption est l'affinité entre deux fluides (liquide - liquide ou liquide - vapeur). Le fluide de travail du système est une solution contenant un fluide de réfrigération (un réfrigérant) et un absorbant, qui ont l'un pour l'autre une forte affinité. On apporte de la chaleur à une solution de réfrigérant et d'absorbant contenue dans le générateur, ce qui produit une évaporation du réfrigérant, qui se sépare du mélange en abandonnant une solution pauvre en réfrigérant. La vapeur produite pénètre dans le condenseur, où elle se liquéfie en cédant de la chaleur. L'ensemble générateur - condenseur constitue la partie haute pression du système. Le réfrigérant liquide accumulé dans le condenseur peut ensuite être détendu de cette zone à haute pression vers un évaporateur à basse pression. L'énergie nécessaire à la vaporisation est empruntée au fluide circulant dans l'évaporateur qui va bien évidemment être refroidi. Après évaporation du réfrigérant dans l'évaporateur et extraction de chaleur de l'accumulateur froid ou du milieu à réfrigérer, le réfrigérant pénètre dans l'absorbeur; dans celui-ci, la vapeur du réfrigérant se recombine avec le mélange en provenance du générateur, pauvre en réfrigérant. Comme cette recombinaison est exothermique, il faut extraire de la chaleur de l'absorbeur afin de maintenir sa température

suffisamment basse pour conserver l'affinité élevée dont on a besoin entre le réfrigérant et la solution. La solution résultante, riche en réfrigérant, est recueillie au fond de l'absorbeur et encore pompée dans le générateur pour y maintenir un niveau et une concentration imposés. C'est la pompe de circulation qui assure la différence de pression voulue dans le système [24, 25]

Chapitre V : Convertisseurs photothermiques aux hautes températures

V.1. Les capteurs solaires thermodynamiques:

On définit par 'solaire thermodynamique' l'ensemble des techniques qui visent à convertir le rayonnement soleil en chaleur à température élevée, puis celle-ci en énergie mécanique puis électrique à travers un cycle thermodynamique dans une centrale solaire.

Il existe différents types de centrales solaires mais toutes sont basées sur le même principe. Elles concentrent les rayons du soleil pour chauffer à très haute température un liquide particulier non vaporisable. Ce liquide chauffe à son tour l'eau d'une chaudière à vapeur, elle-même reliée à une turbine et à un alternateur pour produire de l'électricité. La vapeur d'eau est alors condensée (retourne à l'état liquide) grâce à une tour de refroidissement [26].

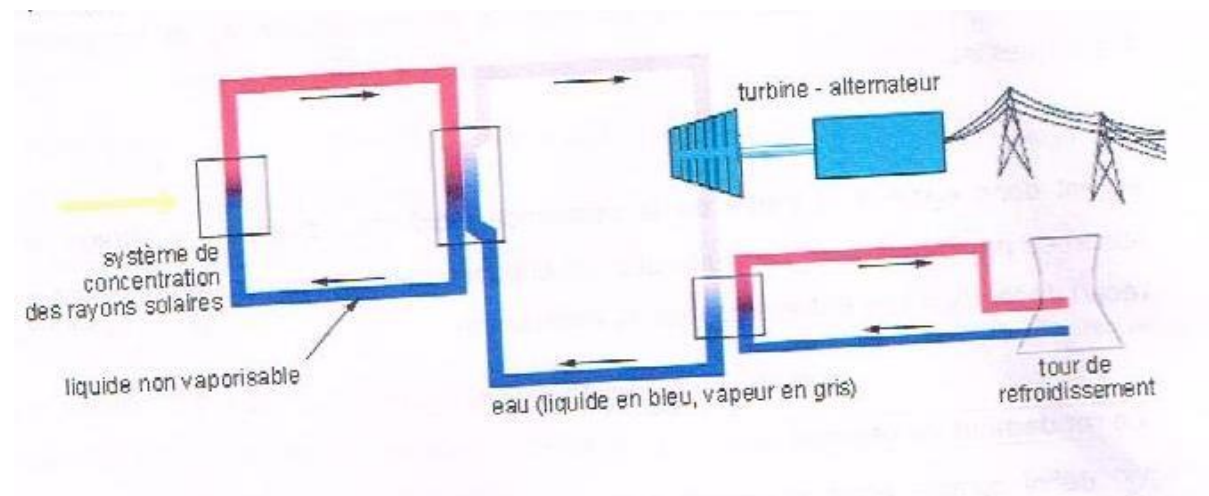
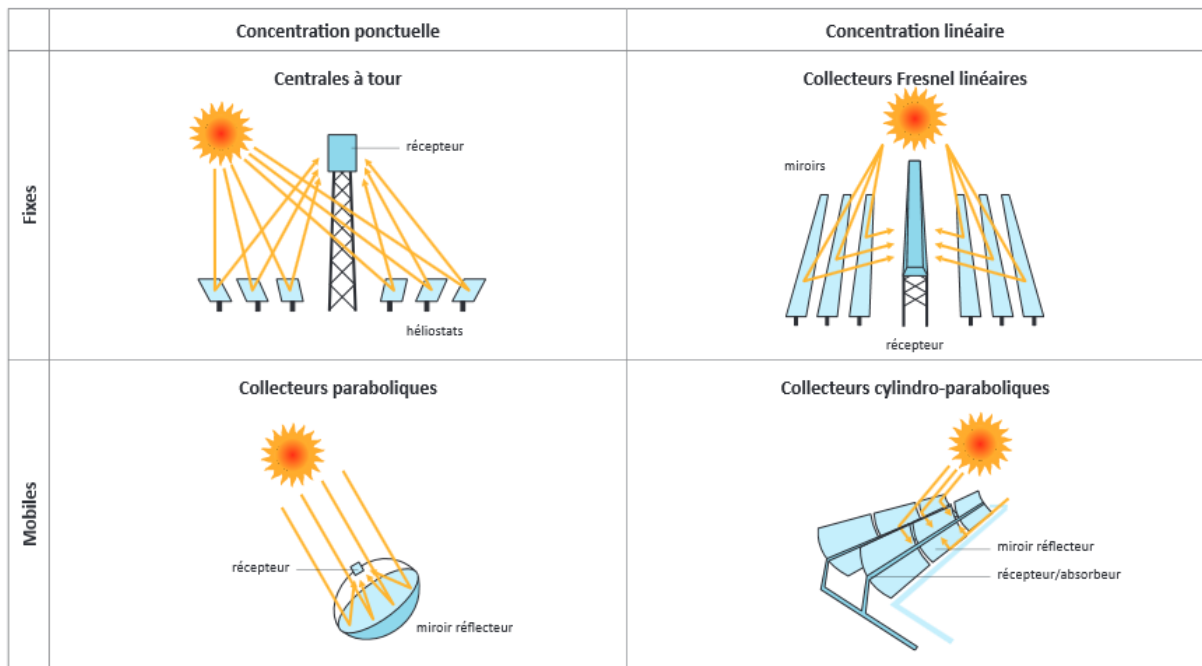


Figure V.1: Principe des capteurs solaires thermodynamiques

V.1.1. Les systèmes de concentration

Le tableau ci-dessous présente les différents systèmes de concentration utilisés pour capter ou concentrer les rayons solaires dans les centrales thermodynamiques [27].



On distingue trois types de centrales solaires, en fonction de la méthode de focalisation des rayons solaires :

1. Centrale à tour
2. Centrales à collecteurs cylindro-paraboliques
3. Les centrales à collecteurs paraboliques

V.1.2. Centrale à tour : Une centrale à tour est constituée d'un champ de capteurs solaires spéciaux appelés héliostats orientables qui concentrent tous le rayonnement solaire avec précision sur un même point (des miroirs). La température obtenue ainsi est de 600°C. Un liquide caloporteur envoyé dans une chaudière située en haut de la tour transforme le liquide en vapeur. La vapeur fait tourner des turbines qui entraînent des alternateurs produisant de l'électricité,



Figure. V.2 : Centrale à tour

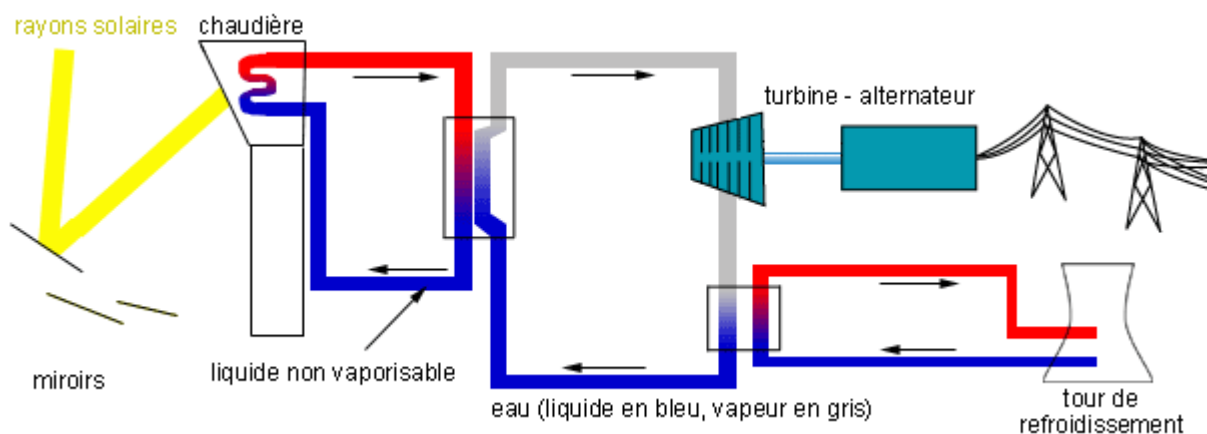


Figure. V.3 : Principe de fonctionnement d'une centrale à tour

V.1.3. Centrales à collecteurs cylindro-paraboliques : ce sont des alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal, où circule le fluide caloporteur qui servira à transporter la chaleur vers la centrale elle-même. La température du fluide peut monter jusqu'à 500°C. Ce type de centrale est le plus fréquent.

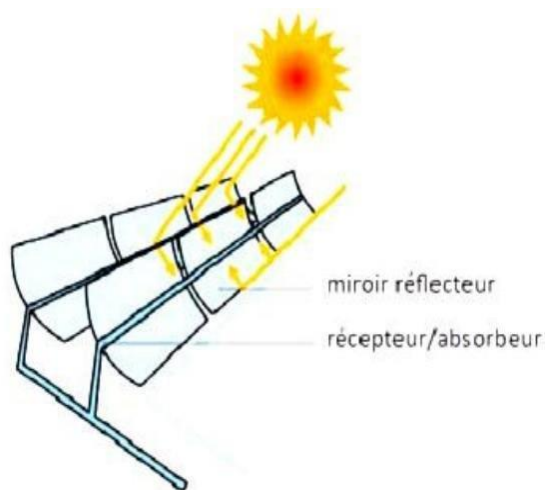


Figure V.4 : Centrale à collecteurs cylindro-paraboliques

V.1.4. Les centrales à collecteurs paraboliques : La même forme que nos antennes paraboliques, mais en plus grand, les paraboles ont un diamètre de 10 à 20m et sont orientables. Le rayonnement solaire est concentré sur la focale de la parabole, où se trouve une mini-centrale électrique. La température obtenue atteint 800°C. La mini-centrale produit de l'électricité grâce à un moteur Stirling, qui fonctionne non pas avec du carburant mais grâce à un apport de chaleur extérieure. Les pistons du moteur se déplacent sous l'effet de l'expansion d'un gaz en un point où arrive la chaleur et de sa contraction en un point plus froid.

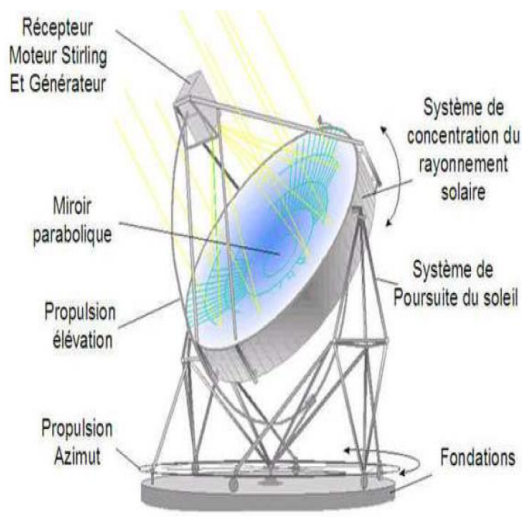


Figure. V.5 : Centrale à collecteurs parabolique

Annexe : Exercices

Exercice 1 : Des échangeurs de chaleur à courants parallèles et à contres courants soumis aux conditions suivantes : $T_{c,i} = 110^\circ\text{C}$, $T_{c,e} = 30^\circ\text{C}$; $m_c = 5000 \text{ kg/h}$; $C_{p,c} = 2100 \text{ J/kgK}$, $T_{f,i} = 12^\circ\text{C}$, $T_{f,s} = ?^\circ\text{C}$; $m_f = 12000 \text{ kg/h}$; $C_{p,f} = 4180 \text{ J/kgK}$

1. Calculez leurs surfaces d'échange.
2. Calculez la puissance de l'échangeur à contre courant.

Exercice 2 : Le transfert de chaleur entre deux fluides s'effectue à travers un tube d'acier de diamètres intérieur/extérieur 18 / 21 mm.

On donne :

- côté intérieur : $h_1 = 1000 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$; température moyenne de mélange $T_1 = 10^\circ\text{C}$
- côté extérieur : $h_2 = 2000 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$; température $T_2 = 25^\circ\text{C}$ - acier : $\lambda = 46 \text{ W / m.K}$.

1. Calculer le coefficient global d'échange k .
2. Après un an de fonctionnement, on estime avoir une résistance d'encrassement $R_e = 4 \cdot 10^{-4} \text{ W}^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{K}$. Déterminer le nouveau coefficient d'échange global.
3. En attribuant une efficacité de 1 au tube neuf, que devient cette efficacité au bout d'un an ?
4. Quel est alors le flux échangé dans un tube de longueur $L = 1 \text{ m}$?

Exercice 3 : Pour refroidir un débit de 9,4 kg/h d'air de 616 °C à 178 °C, on le fait passer dans le tube central d'un échangeur bitube à contre-courant de 1,5 m de long, de 2 cm de diamètre et de faible épaisseur.

1. Calculer la puissance calorifique à évacuer. On donne pour l'air : $C_{pc} = 1060 \text{ J kg / K}$.
2. Le fluide de refroidissement est de l'eau, qui pénètre dans la section annulaire à la température de 16 °C avec un débit de 0,6 l/mn. Calculer la température de cette eau à la sortie de l'échangeur. On prendra $C_{pf} = 4180 \text{ J / kg .K}$
3. Calculer le coefficient d'échange h_c côté fluide chaud (on ne tiendra pas compte d'une éventuelle correction en μ / μ_p).
4. Déterminer l'efficacité de cet échangeur, puis son NUT. En déduire le coefficient d'échange global, puis le coefficient d'échange h_f côté fluide froid.

Exercice 4 :

Caractéristiques techniques des capteurs solaires

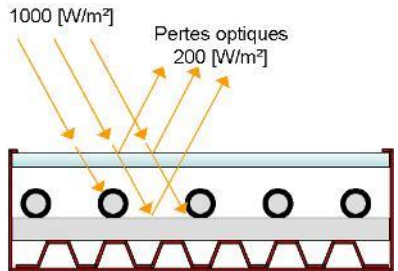
Les capteurs sont caractérisés par :

- Leurs pertes optiques
- Leurs pertes thermiques

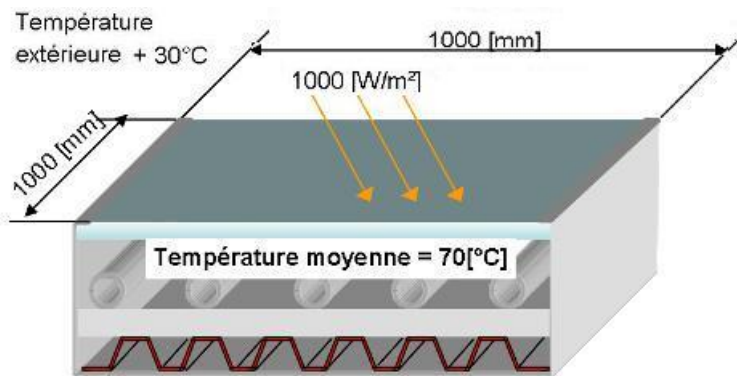
Ces pertes permettent par ailleurs de calculer le rendement global du capteur, pour une situation de fonctionnement donnée.

Questions :

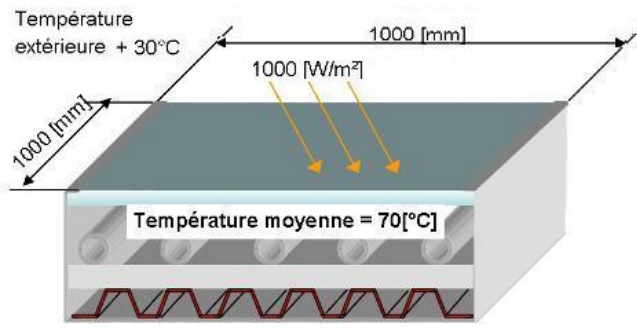
Q1: Quel est le rendement optique du capteur ci-dessous :



Q2 : Calculez la puissance réellement récupérée sur le capteur ci-dessous, sachant que son rendement optique est de 85% et son coefficient k de $3 \text{ [W/m}^2\text{°C]}$.



Q3 : Quel est le rendement global du capteur solaire étudié dans l'exercice précédent?



Q4 : En utilisant la formule de calcul du rendement, pour un rayonnement solaire de $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$, un rendement optique de 85% et un coefficient k de $3 \text{ [W/m}^2\text{°C]}$, calculez le rendement global du capteur défini dans le 1^{er} exercice ci-dessus.

Exercice 5 :

Un capteur solaire thermique est constitué d'une vitre et d'un serpentin noir.

De l'eau circule dans le serpentin avec un débit de 20,0 L par heure. La température de l'eau, à l'entrée du serpentin, est égale à 14,9 °C, alors qu'elle est de 35,2 °C à la sortie.

1. Quel est le mode de transfert d'énergie reçu par le capteur solaire ?
2. Quels sont les rôles respectifs de la vitre et de la peinture noire ?
3. Comment se nomme ce phénomène ?
4. Calculer la valeur du transfert d'énergie fourni à l'eau chaque seconde.
5. Au cours de cette expérience, la puissance rayonnante reçue est de 800 W. Calculer le rendement de ce capteur solaire.

Donnée : $C(\text{eau}) = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

Exercice 6 : Grâce au « Plan Soleil » de l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), de nombreux bâtiments collectifs exploitent, maintenant, les énergies renouvelables, en particulier le « solaire thermique ».

L'eau chaude de certains foyers est ainsi obtenue en utilisant des panneaux thermiques solaires.

- 1) Schématiser les transferts et conversions d'énergie dans un panneau thermique solaire.
- 2) Le débit du fluide caloporteur (ici, l'eau) circulant à l'intérieur des tuyaux est $D=50\text{L.h}^{-1}$. L'eau entre à la température $T_e = 18^\circ\text{C}$ et sort à la température $T_s=54^\circ\text{C}$.

Calculer l'énergie reçue par l'eau pendant une durée d'une heure. En déduire la puissance fournie par le panneau.

Données : pour élever de 1°C la température de 1kg (donc 1L) d'eau, il faut fournir une énergie de 4,21 KJ dans les conditions d'utilisation du panneau.

- 3) Le panneau thermique solaire a pour surface $S=2,6 \text{ m}^2$. Calculer le rendement de ce panneau pour une puissance lumineuse reçue de 1000W.m^{-2} .

Exercice 7: L'absorbeur d'un capteur plan sans vitrage à un facteur d'absorption $\alpha = 0.95$, et une émissivité de $\varepsilon = 0.1$. A un instant donné de la journée, nous avons les données suivantes : la température de la surface supérieure de l'absorbeur $T_s = 120^\circ\text{C}$, l'éclairement global $E^* = 750 \text{ W.m}^{-2}$, la température ambiante $T_a = 30^\circ\text{C}$.

1. Donner un schéma explicatif de cette configuration,
2. Calculer le flux utile transmis par l'absorbeur au fluide caloporteur,
3. Quel est le rendement global de ce capteur ?

Supposant que le coefficient d'échange convectif peut être estimé, quand le ciel est clair, par la relation suivante : $\bar{h} = 0.22(T_s - T_\infty)^{1/3} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Le principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire est schématisé ci-contre. Le capteur de rayonnement est constitué d'une boîte fermée par une plaque de verre, sa surface est de 2m². Placé sur le toit, ce capteur permet de fournir l'eau chaude d'une maison individuelle, dans un région bien ensoleillée. Un essai d'utilisation de cet appareil, pendant une période ensoleillée (puissance solaire estimée à 800W/m²), a donné les résultats suivants :

Débit de l'eau circulant dans le capteur: D=20L.h⁻¹. La température d'entrée de l'eau T_e=15°C. La température de sortie de l'eau T_s=40°C.

- 1) Identifier le mode de transfert de l'énergie du soleil au panneau solaire
- 2) Calculer la quantité de chaleur absorbée par l'eau circulant dans le capteur
- 3) Calculer la puissance thermique du chauffe-eau solaire pendant une heure
- 4) Calculer le rendement global.

Données

Masse volumique de l'eau : $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$;

Capacité thermique de l'eau: $C_{\text{eau}} = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$;

Exercice 8: Une maison de campagne est dotée d'un capteur solaire thermique pour chauffer l'eau. L'eau chaude est à une température T_c = 55°C et l'eau froide est prise à T_f = 15°C. La consommation d'eau chaude est estimée par jour à V=300L.

Données : C_{eau}= 4180 J.kg⁻¹.°C⁻¹

- 1) Déterminer l'énergie nécessaire par jour pour élever la température de l'eau
- 2) L'énergie solaire qui arrive au capteur n'est pas entièrement transmise à l'eau. Le rendement est de $\eta=40\%$. Quelle énergie solaire doit recevoir le capteur pour chauffer l'eau.
- 3) L'ensoleillement journalier moyen par unité de surface dépend de la période de l'année :

$$E_{\text{max}}^* = 6 \text{ kWh/m}^2 \text{ pendant les mois ensoleillés}$$

$$E_{\text{min}}^* = 3 \text{ kWh/m}^2 \text{ pendant les mois moins ensoleillés}$$

3.a. Quelle est la surface du capteur nécessaire pendant les mois ensoleillés ?

3.b. La capteur a une dimension de 8 m². Avec une telle installation quelle est la température de l'eau obtenue pendant les mois ensoleillés ?

Exercice 9:

Un panneau solaire d'un mètre carré est capable de fournir une énergie Q=1,03×10³Wh par jour. L'énergie reçue par unité de surface et par jour est de 3440Wh/m²/jour

- 1) Calculer le rendement d'un tel panneau

2) On souhaite élever la température de l'eau du ballon de

-Déterminer la valeur de l'énergie Q en joules

-Déterminer la valeur de la masse m_l d'eau pouvant être chauffée par un panneau d'un mètre carré.

-Calculer le volume maximum du ballon d'eau chaude, sachant que seuls quatre panneaux d'un mètre carré peuvent être installés sur le pont. Exprimer le résultat en m^3 puis en L.

Exercice 10 :

Une piscine rectangulaire mesure 20 m de long, 10 m de large et une profondeur de 3 m.

1) Calculer la quantité de chaleur mise en jeu, lorsque la température de l'eau de la piscine varie de 1°C .

Pendant le jour, l'eau se réchauffe grâce au rayonnement solaire. L'eau reçoit une puissance moyenne $P_1 = 300 \text{ W/m}^2$, pendant une journée de 12 h. L'eau n'absorbe en fait que 50 % de cette puissance.

2) Calculer l'énergie Q_1 absorbée par l'eau pendant ces 12 h.

3) Calculer pour cette eau, l'augmentation de température qui en résulte.

Pendant la nuit l'eau de la piscine rayonne de l'énergie vers l'atmosphère. On considère que l'eau se comporte comme un corps noir ; on admet que sa température est .

4) Calculer la puissance P_2 perdue par rayonnement par la surface totale de l'eau.

5) Calculer l'énergie thermique Q_2 perdue au cours de 12 h de nuit.

6) Calculer pour cette eau, la baisse de température qui en résulte.

7) Faire le bilan énergétique sur une journée de 24 h.

Capacité thermique massique de l'eau:

$$C_{\text{eau}} = 4180 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1} ;$$

loi de Stéphan $P = \sigma T^4$ ou P s'exprime en Wm^{-2} ; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

Exercice 11 :

Le ballon est assimilé à un cylindre de hauteur $H = 1,0 \text{ m}$ et de volume $V = 150 \text{ L}$. L'eau froide arrive à la température $T_f = 15^\circ\text{C}$ et l'eau chaude sanitaire doit sortir à la température $T_c = 65^\circ\text{C}$. L'appareil est arrêté depuis plusieurs jours et doit être remis en fonctionnement. On considère qu'il est rempli d'eau froide à la température $T_f = 15^\circ\text{C}$.

1) Calculer la quantité de chaleur, notée Q , pour élever la température de l'eau jusqu'à 65°C .

2) Calculer la puissance minimale nécessaire pour que la durée de cette opération soit de 5 heures.

3) Déterminer la surface du panneau solaire pour avoir une installation de puissance utile $P = 1800 \text{ W}$

4) Le fluide caloporteur circule dans le circuit primaire à un débit volumique Q_v . Il entre dans le capteur solaire à la température $T_1 = 60^\circ\text{C}$ et ressort à la température $T_2 = 75^\circ\text{C}$.

4.a) Etablir l'expression de P en fonction de Q_v , T_1 et T_2 .

4.b) Calculer Q_v (L h^{-1})

4.c) Calculer la vitesse de circulation du fluide. Diamètre intérieur des tuyaux $d = 12 \text{ mm}$

4.d) Déterminer la pression P_A au niveau de la pompe.

Exercice 12 :

On dispose d'un distillateur en fonctionnement et on souhaite déterminer ces caractéristiques en effectuant certaines mesures.

A l'aide des thermocouples type K, on peut mesurer les températures suivantes :

- Températures de la vitre (faces intérieure et extérieure)
- Température d'eau du bassin
- Température ambiante

Entre 11h 30 et 13h 30, ces températures peuvent être considérées constantes et égales successivement à 80°C , 77°C , 92°C et 35°C .

La superficie du verre est de 0.8m^2 , son épaisseur est de 0.003m et la conductivité thermique du verre est égale à $0.78\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

-Déterminer la quantité de chaleur fournie par l'eau du bassin et reçue par vitre.

Si les mesures sont effectuées à Batna $E^* = 1000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

-Déterminer le débit du distillat

Si le coefficient d'échange convectif peut être estimé, quand le ciel est clair, par la relation suivante : $h = 0.22(T_s - T_a)^{1/3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

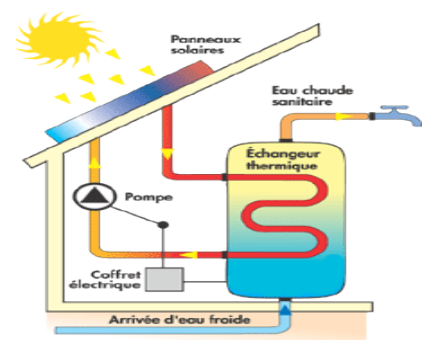
- Déterminer le coefficient d'échange par rayonnement.
- Déterminer l'effectivité globale et interne de ce distillateur.

Données :

A $T = T_1$, la chaleur spécifique de l'eau est de $4.21 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et sa chaleur latente est égale à $2278 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Exercice 13 :

Le principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire est schématisé ci-après. Le capteur de rayonnement est constitué d'une boîte fermée par une plaque de verre. Placé sur le toit, ce capteur permet de fournir l'eau chaude d'une maison individuelle, dans une région bien ensoleillée.



1) Citer les formes d'énergies mises en jeu lors du fonctionnement de ce chauffe eau solaire. Préciser leur mode de transformation mutuelle.

2) Un essai d'utilisation de cet appareil, pendant une période ensoleillée, a donné les résultats suivants:

- débit de l'eau circulant dans le capteur: $D_V = 18 \text{ L.h}^{-1}$.
- température d'entrée de l'eau: 15°C
- température de sortie de l'eau : 50°C
- Calculer la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'eau de 15°C à 50°C . -Exprimer le résultat en kJ et en kWh.
- La puissance thermique utile reçue par l'eau circulant dans le capteur est de la forme $P = D_m \times C \times \Delta T$ (D_m : Débit massique). Justifier cette expression et faire l'application numérique.

3) Un bilan de fonctionnement établi sur 3 jours a donné les résultats suivants: on a récupéré 350 litre d'eau chaude à 45°C du réservoir. Cette eau était initialement à la température de 12°C . L'appareil a fonctionné 8 heures par jour.

- Calculer l'énergie fournie par l'installation durant cette période de 3 jours.
- Définir le rendement énergétique de l'installation, puis calculer ce rendement sachant que la surface du capteur est 3m^2 et que la puissance solaire disponible pendant la période d'essai est 800 W.m^{-2} .

Avec: $C_{\text{eau}} = 4185 \text{ J.kg}^{-1}.\text{C}^{-1}$, $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$

Exercice14:

Une piscine d'aire $S = 140 \text{ m}^2$ contient 200 m^3 d'eau. En plein soleil, en été, la puissance solaire reçue à la surface de la Terre est $E^* = 500 \text{ W.m}^{-2}$. Sachant que 60 % de cette puissance est absorbée par l'eau de la piscine, calculer :

- 1) L'énergie solaire reçue par l'eau de la piscine pendant 2,5 heures (entre midi et 14 heures 30).
- 2) La variation de température de l'eau de la piscine, dans cet intervalle de temps.

Références

- [1] BOURAGBI Lakhdar, "Etude et amélioration du rendement de la conversion photothermique du capteur solaire," Thèse de magistère, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2008, pp. 124.
- [2] J. Spitz, A. Aubert, J.M. Behaghel, Serge Berthier, J. Lafait, and J. Rivory, "Matériaux sélectifs pour la conversion photothermique de l'énergie solaire," *REVUE DE PHYSIQUE APPLIQUEE*, pp. 67, TOME 14, JANVIER 1979.
- [3] M. C. GREMION, "Elaboration et caractérisation d'absorbeurs sélectifs platine-alumine pour le solaire thermique a concentration a haute température," Thèse de doctorat, Université de Lyon, 2015, pp. 115.
- [4] BINTOU OUEDRAOGO, "Développement de couches absorbantes a base de composites Al_2O_3 -NiO pour des applications en énergie solaire thermique," Thèse de doctorat, Université de Montréal, 2013, pp. 176.
- [5] SEMAI Hakim, "Le vitrage solaire," *Division Solaire Thermique et Géothermie - CDER, N° 27 2013*.
- [6] Christophe MARVILLET, "Fluides, controle et isolation thermiques," *Réf. Internet : 42595 / 3e édition, www.techniques-ingenieur.fr*.
- [7] E. Rouland, "Les Echangeurs Thermiques," Université de Rouen, GSI-M1 -2011-2012.
- [8] F. M. Oudina, *Echangeurs de chaleur: Cours et Exercices corrigés, Editions Al-Djazair*, 2014, pp.54.
- [9] M. Salmi, "Contribution a la quantification de l'irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques," Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012.
- [10] K. D, Edwards,, "Capteurs solaires," Edition SCM, paris. (1979).
- [11] N.Bellel, " Etude des transferts thermiques le long d'un tube cylindrique appliquée a deux géométries," Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2004.
- [12] <http://www.edfenr.com/lexique-photovoltaïque/definition-capteur-solaire-thermique>.
- [13] Boudjemaa Agoudjil, "Conversion d'énergie," *Cours, Université de Batna*, 2009.
- [14] Salmi Mouhamed, "Le gisement solaire," Cours, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2015, pp. 74.
- [15] S.A. Kalogirou, "Solar thermal collectors and applications," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, pp. 231-295, 2004.

- [16] J.M.Chassériau, " Conversion thermique du rayonnement solaire," in *bordas Paris*, 1984.
- [17] M. MESSOUAF Samir, "Contribution a l'étude de la production d'eau chaude domestique par l'énergie solaire a l'aide de réflecteur cylindroparabolique," Mémoire de Magister, Université M'hamed Bougara Boumerdès, 2014, pp. 159.
- [18] A.OUBARRA, "Conversion de l'énergie solaire," Université Hassan ii, Casablanca, 11 – 15 Mai 2010.
- [19] J.Bernard, "Energie solaire calculs et optimisation," Ellipse Edition Marketing.(2004).
- [20] Boudjemaa Agoudjil, "Conversion d'énergie,," *Cours, Université de Batna, 2009*.
- [21] Pablo Gonzalez Gascon y Marin, Guillermo Gomez Fontecha, and Ole Geisen, "les tours solaires," *Energies renouvelables, ENSTA ParisTech*, 2011.
- [22] Yves JANNOT, "Thermique solaire," *pp. 80, Mars, 2011*.
- [23] Mamadou Karass KANE and Abdou Khadir FALL, "Conception d'un système de climatisation solaire par refroidisseur à absorption: application a des réceptifs hoteliers," projet de fin d'étude, Université cheikh anta diop de dakar, 2007.
- [24] Agnimoan Constant ALIHONOU, et al, "Climatisation solaire a absorption, mode de fonctionnement et description des différents éléments d'une unité de climatisation solaire dans le monde : Revue de littérature," *International Journal of biological and chemical sciences*, vol. 13, pp. 1890-1902, 2019.
- [25] <https://www.lepanneausolaire.net/principe-fonctionnement-climatisation-solaire.php>.
- [26] M. Aksas, " "Energies Renouvelables," *Cours, Université de Batna, 2010/2011*.
- [27] Kalla Faycal, "Conversion thermodynamique de l'énergie solaire: Etude et modélisation d'un capteur solaire," Thèse de magistère, 2014, pp. 73.