

**MODULE : ÉNERGIES ÉOLIENNE, ÉNERGIES SOLAIRE THERMIQUE,
ÉNERGIES PHOTOVOLTAÏQUE**

Partie : ÉNERGIE SOLAIRE THERMIQUE

« Master Génie Énergétique et environnement » Ms GEE

INTRODUCTION

I- PRÉSENTATION ET PROBLÉMATIQUE NATIONALE

II- SOLUTIONS EN ENERGIES RENOUVELABLES.

III- DÉFINITION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

1- L'ENERGIE SOLAIRE :

a- *Flux énergétique du rayonnement*

b- *La structure de l'atmosphère.*

c- *La composition de l'atmosphère:*

2- SOLAIRE THERMIQUE BASSE TEMPERATURE:

3- SOLAIRE THERMIQUE HAUTE TEMPERATURE:

4- EXEMPLE DU SOLAIRE THERMIQUE: BASSE TEMPERATURE

Cas : *Etude d'un capteur solaire plan*

a- *Bilan énergétique : hypothèses*

b- Calcul du flux $\varphi_{0 \rightarrow 7}$

c- calcul du flux $\varphi_{6 \rightarrow 0}$

IV- LE DIMENSIONNEMENT DES EQUIPEMENTS SOLAIRES

1- Principes du dimensionnement

2- Exemple

**V- ÉVALUATION DE LA PRODUCTION ENERGETIQUE INSTANTANEE
D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN.**

1- Équation fondamentale

2- Définition des coefficients caractéristiques

Pr. B.KHARBOUCH

INTRODUCTION

Dans le but de mieux compléter nos connaissances et de les utiliser afin d'étudier une problématique existante dans notre vie professionnelle, on est appelé à mettre en pratique le savoir et le savoir-faire accumulée lors des années études.

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable par rapport à l'homme. Elles sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le soleil (rayonnement), mais aussi la lune (marée) et la terre (énergie géothermique). .

Ces énergies se trouvent en quantité suffisante sur la terre. Mais les moyens de captage nécessitent de la place et sont relativement onéreux. Malgré les progrès technologiques continus, la part globale des énergies renouvelables n'augmente que très lentement. Il s'agit de l'énergie solaire (photovoltaïque ou thermique), l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie

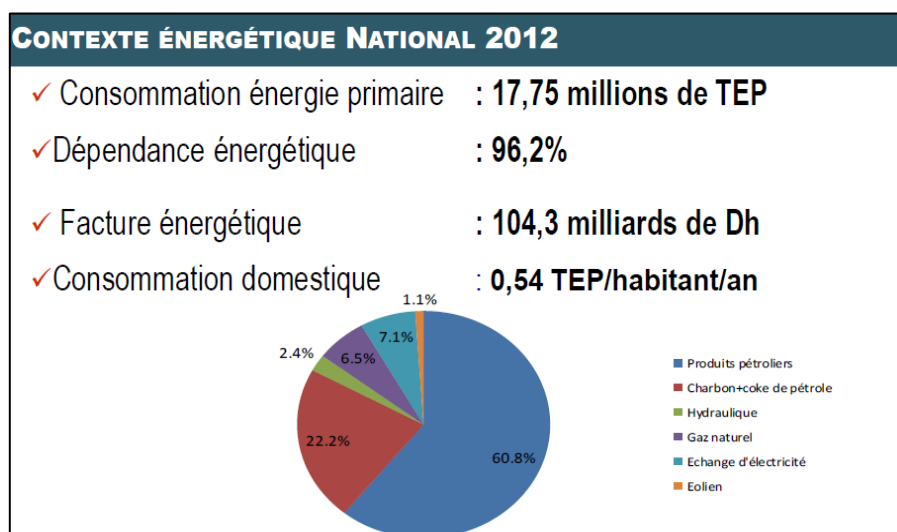
Présentation et Problématique

Une grande partie de l'énergie consommée en 2002 dans le monde (près de 90%) provient de gisements de combustibles fossiles (Agence Internationale de l'Energie, 2004).

- *pétrole (35 %),*
- *gaz (21 %),*
- *charbon (24 %) et*
- *uranium (7%)*

sur 26,8 milliards de barils de pétrole consommés chaque année, la moitié l'est pour le secteur des transports. Pourtant, ces sources traditionnelles d'énergie posent de nombreux problèmes :

I- PRÉSENTATION ET PROBLÉMATIQUE NATIONALE



Le Maroc souhaite tirer profit de ses atouts pour augmenter la part des énergies renouvelables

ATOUTS DU MAROC POUR LE DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

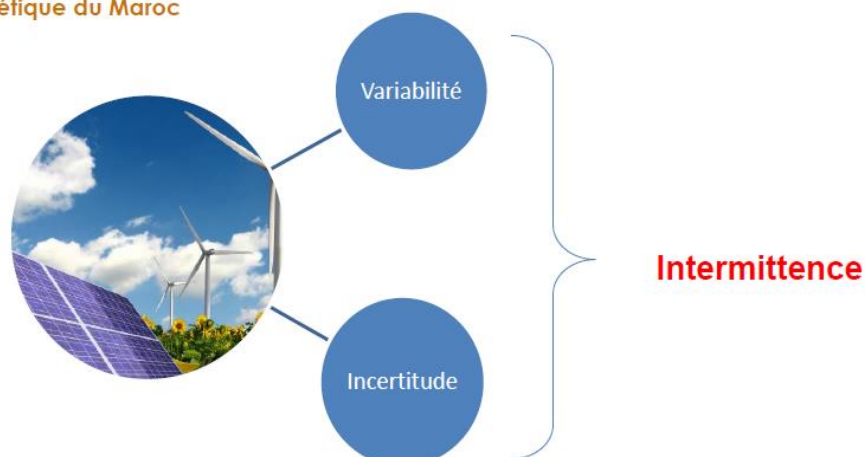
- 1 Potentiel "énergie renouvelable" considérable
- 2 Infrastructure énergétique de transit très développée
- 3 Capacité à réaliser les grands projets
- 4 Cadre législatif et institutionnel attractif
- 5 Important potentiel de croissance de la demande

OBJECTIFS

Part des énergies renouvelables dans la puissance installée totale
42%

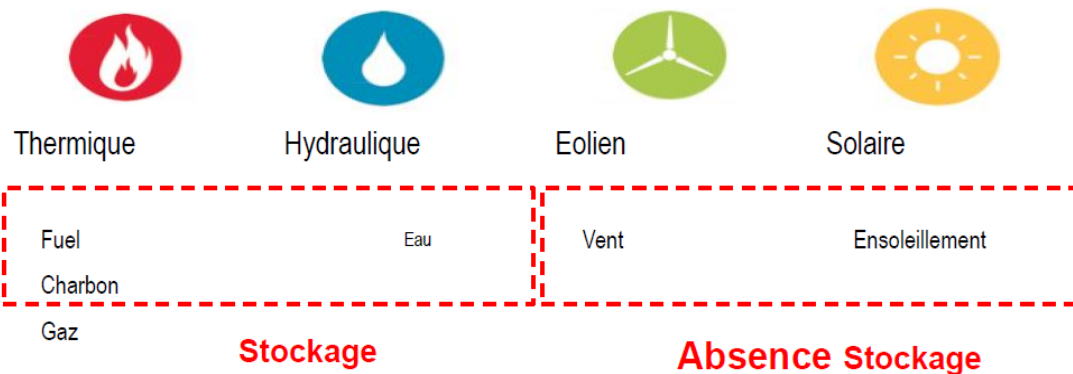
en %	2020
Hydraulique	14%
Solaire	14%
Eolien	14%

Politique énergétique du Maroc



Problématique de l'intégration des EnR

Incertitude de la production



Le Maroc est affaibli par sa forte dépendance énergétique vis-à-vis de l'extérieur, qui représente 96% de sa consommation énergétique en 2012. La volatilité des cours des matières premières, conjuguée aux besoins énergétiques par habitant croissants, exercent de fortes tensions sur la balance commerciale et sur les finances publiques.

« Le Maroc a enregistré des records historiques de la puissance électrique appelée, aussi bien au niveau de la pointe du matin que celle du soir du lundi 7 août 2017 ainsi que de la consommation journalière en énergie électrique le mardi 8 août 2017 », a annoncé l'Office national de l'électricité et de l'eau potable (ONE).

En effet, « ces records sont dus, notamment à l'utilisation massive de la climatisation et des pompes agricoles pour les besoins d'irrigation et ce, en raison de la période de forte chaleur qu'enregistre actuellement l'ensemble des régions du Royaume »,

La facture énergétique a enregistré un taux de croissance annuel de 18,8% en moyenne depuis 2002, atteignant 107 milliards de dirhams en 2012, tirée par une progression de 5,7% en moyenne par an de la consommation d'énergie portée à 17,8 millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtep).

Face aux exigences en matière de développement et à l'évolution du contexte énergétique mondial, le Maroc a entamé un processus de diversification du mix-énergétique national en faveur des énergies renouvelables, tout en veillant à disposer d'une énergie compétitive, en termes de coûts, de disponibilité des produits et de leur sécurisation et pérennisation.

II- SOLUTIONS EN ENERGIES RENOUVELABLES.

Depuis 2002 le Maroc a mis en place une stratégie ambitieuse de développement des énergies renouvelables sur son territoire. La politique déployée dans le domaine de l'énergie est notamment de réduire la vulnérabilité et la dépendance énergétique du territoire, plus exactement, il s'inscrit dans les actions engagées par la Maroc en vue de répondre aux objectifs visés par la Cop21 et la Cop22: ce projet porte sur le développement et la promotion des énergies renouvelables.

Dans ce cadre, le Maroc a lancé en 2009 une stratégie énergétique nationale dont les orientations majeures portent sur la sécurisation de l'approvisionnement énergétique et la généralisation de son accès, à la préservation de l'environnement, à travers le recours aux énergies renouvelables et via l'efficacité énergétique, et le renforcement de l'interconnexion et de la coopération régionale.

Cette stratégie a été confortée par le lancement officiel du plan solaire marocain, en novembre 2009 à Ouarzazate, et du programme marocain intégré de l'énergie éolienne en juin 2010 à Tanger, qui devraient permettre de réduire la dépendance énergétique et de préserver l'environnement.

Maroc en 2012 :

- Pétrole..... 23,4%
- Gaz14,3%
- Eolien2,5%
- Charbon47,7%
- Hydraulique12,1%

Le Maroc installe depuis 2012 des panneaux solaires à perte de vue dans ce coin du désert pour couvrir une surface de 15 km², soit « l'équivalent de 35 terrains de foot »

Le roi Mohammed VI a présidé, jeudi 4 février 2016 à Ouarzazate la cérémonie de mise en service de la première centrale du complexe solaire « Noor-Ouarzazate », baptisée « Noor I », et procédé au lancement officiel des travaux de réalisation de la deuxième et troisième centrale de ce méga-projet (Noor II et Noor III).

Gérée par l'Agence marocaine d'énergie solaire (MASEN), la centrale qui s'étend sur plus de 450 hectares devrait générer autour de 160 mégawatts. Le complexe est composé de 500 plaques réfléchissantes incurvées sur 800 rangées

C'est donc une première phase qui s'achève, illustrant la détermination du pays à réduire la dépendance aux énergies fossiles et à utiliser davantage les énergies renouvelables. C'est un cap majeur que vient de franchir la centrale solaire Noor I. Le complexe a été officiellement inauguré par le roi Mohammed VI à Ouarzazate, devant un parterre de personnalités politiques marocaines et étrangères. Avec les trois autres stations Noor 2, Noor 3 et Noor 4, elle constituera la plus grande centrale solaire au monde avec une puissance installée de 580 MW. La construction de la centrale Noor I s'est faite dans un délai de 30 mois et a mobilisé plus de 2.000 employés, dont 85% de Marocains de MASEN. Entre 2018 et 2020, Ouarzazate nourrit l'ambition de se hisser au premier rang solaire avec une production annuelle capable de fournir de l'électricité à 1,1 million de Marocain. En tout, quatre centrales – trois thermo-solaires et une photovoltaïque – sont prévues dans le complexe de Ouarzazate, le plus grand au monde, pour une capacité de plus de 500 MW au total sur 2.500 hectares et une production de 1.150 GWh/an. Le complexe vise à fournir de l'énergie à 1,1 million de Marocains d'ici 2018. Ce complexe vise à réduire la dépendance du pays au pétrole de 2,5 millions de tonnes et réduire les émissions de gaz à effet de serre de 760.000 tonnes par an à terme, d'autres parcs solaires devraient voir le jour dans le royaume, à quelques centaines de kilomètres d'Ouarzazate, notamment sur les sites de Midelt et Tata, pour une production totale de 2.000 MW.

« Grâce à cette étape importante vers un avenir alimenté par les énergies propres, le Maroc ouvre la voie à une croissance plus verte et développe une technologie de pointe » « Les retours sur investissements seront importants pour le pays et ses habitants en renforçant la sécurité énergétique, en créant un environnement plus propre et en encourageant de nouvelles industries et la création d'emplois. »

L'inauguration de cette première centrale intervient quelques mois avant l'organisation de la prochaine conférence sur le climat à Marrakech, la COP 22, en novembre 2016.

L'organisation internationale, l'un des principaux financiers de ce projet, estime qu'il s'agit de l'un des projets de transition énergétique les plus ambitieux du monde.

Ce projet « doit permettre au Maroc de réduire ses émissions de carbone de 760 000 tonnes par an »,

Le parc solaire Noor représente la pierre angulaire du plan marocain qui prévoit de produire 42 % de son électricité grâce aux énergies renouvelables d'ici 2030.

Grâce à Noor, le Maroc pourrait même devenir exportateur d'énergie. Lorsque le parc solaire fonctionnera à plein régime, il devrait produire davantage d'énergie que le pays n'en consomme. « Il est évident que le Maroc devrait être capable d'exporter cette énergie vers l'Europe.

L'utilisation d'énergies renouvelables assure une gestion intelligente des ressources tout en développant l'emploi local.

La connaissance précise des dommages environnementaux est indispensable pour progresser vers un usage raisonné de l'énergie, tenant compte des nuisances potentielles. Elle constitue aussi un instrument d'orientation des choix vers des filières énergétiques les plus respectueuses de l'environnement.

Les énergies renouvelables présentent un atout majeur par rapport aux ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon). Elles utilisent des sources naturelles comme la chaleur de la terre, les marées ou le soleil, soit directement, soit par l'intermédiaire du vent, des courants marins, des écoulements d'eau, de la photosynthèse, du recyclage des déchets. En plus de leur caractère inépuisable, les énergies renouvelables émettent peu ou pas de polluants (éolien, solaire), elles sont disponibles sur notre territoire, ce qui crée de l'emploi (bois énergie), augmente l'indépendance énergétique et aide à stabiliser le coût de l'énergie.

Le développement des énergies renouvelables doit prendre en compte les différentes politiques environnementales (lutte contre l'effet de serre, protection des milieux naturels, santé, sécurité, etc.).

Dans ce sens, une approche intégrée de l'ensemble des impacts sur l'environnement de chaque projet permet de développer des projets de qualité, respectueux de l'environnement.

III- DÉFINITION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Les énergies renouvelables sont des énergies primaires inépuisables à très long terme, car issues directement de phénomènes naturels, réguliers ou constants, liés à l'énergie du soleil, de la terre ou de la gravitation.

Les énergies renouvelables sont également plus « propres » (moins d'émissions de CO₂, moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles.



Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales, génèrent des emplois.

Les principales énergies renouvelables:

- L'énergie solaire
- L'énergie éolienne
- L'énergie hydraulique
- L'énergie pile à combustible
- la biomasse
- la géothermie

Sont des énergies flux inépuisables par rapport aux « énergies stock » tirées des gisements de combustibles fossiles en voie de raréfaction : pétrole, charbon, lignite, gaz naturel.

Entrez dans l'univers des énergies renouvelables : Quelles sources d'énergies ? Pour quels besoins ? Comment les capter, les transformer ? Sous quelle forme les utiliser ?

1- L'ÉNERGIE SOLAIRE :

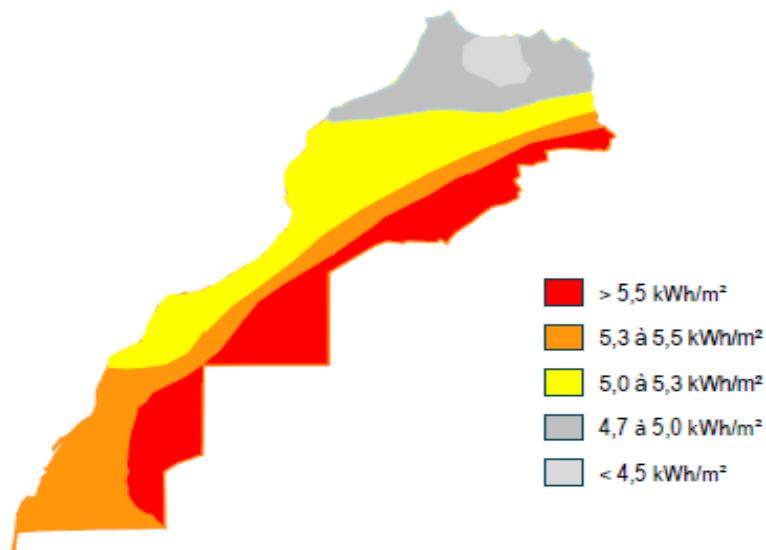
L'énergie solaire transforme le rayonnement solaire en électricité ou en chaleur, selon les technologies.

A ce titre, nous distinguerons

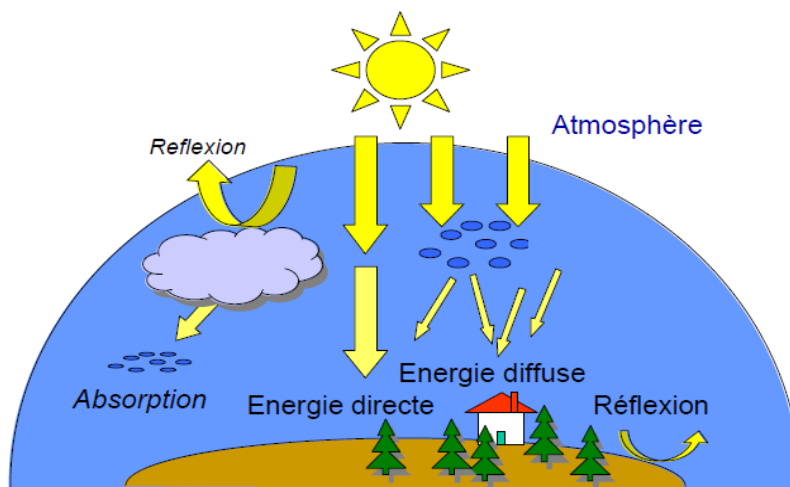
- ✓ Le solaire thermique,
- ✓ Le solaire photovoltaïque.
- ✓ Le solaire thermodynamique

Au Maroc le gisement solaire se présente comme suit:

GISEMENT SOLAIRE : 5,5 Kwh/m²/j



a- Flux énergétique du rayonnement



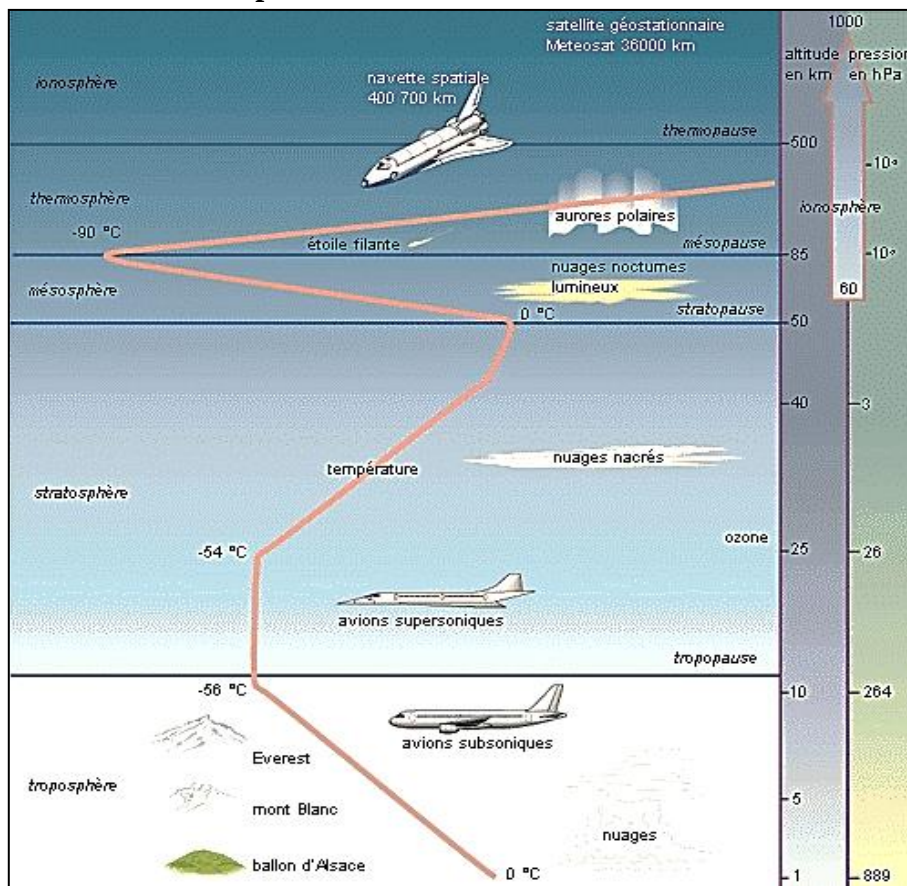
Le rayonnement électromagnétique transporte à travers l'espace une certaine quantité d'énergie avec une certaine répartition spectrale.

L'énergie transportée par unité de temps est la mesure naturelle de l'intensité d'un faisceau. Un faisceau est caractérisé par la quantité d'énergie qu'il transporte à travers l'atmosphère. La quantité transportée est mesurée par unité de temps est exprimée en Watts. On lui a donné le nom de flux d'énergie.

b- **La structure de l'atmosphère.**

On peut grossièrement diviser l'atmosphère en 4 couches distinctes aux propriétés tout à fait différentes et distinctement séparées (Cf. La Recherche, Février 1982):

- la troposphère
- la stratosphère
- la mésosphère
- l'ionosphère



L'atmosphère est découpée en plusieurs couches. A chacune de ces couches correspond une loi d'évolution de température :

- **troposphère** $0 < z < 11 \text{ km}$; $dT/dz = -6,5 \text{ °C/km}$
 - **stratosphère** $11 < z < 50 \text{ km}$; $T = \text{constante} = -50 \text{ °C}$
 - **mésosphère** $50 < z < 90 \text{ km}$; $T = \text{constante} = +80 \text{ °C}$
 - **thermosphère** $90 < z < 300 \text{ km}$
 - **exosphère** $z > 300 \text{ km}$
- **la troposphère**: qui s'étend jusqu'à 10 à 12 km d'altitude et où la température décroît de 6.5 °C par km, pour atteindre - 56 °C à la base de la couche suivante.

- **la stratosphère** : de 12 à 55 km où la température croît de -56 °C à 0 °C jusqu'à la stratopause. C'est elle qui contient une mince couche d'ozone.
- **la mésosphère**: de 50 à 85 km où la température décroît à nouveau de 0°C à -90 °C.
- **l'ionosphère**: (confondue avec la thermosphère) et où la température croît régulièrement pour atteindre 1500°C. C'est elle qui contient les couches réfléchissantes pour les ondes radio; elle s'étend jusqu'à 700km d'altitude.
- **l'exosphère**: au-delà de 700 km qui s'ouvre sans frontière sur l'espace intersidéral (interplanétaire).

c- La composition de l'atmosphère:

La composition de l'atmosphère est à peu près la même pour les trois premières couches:

- 78 % d'azote,
- 21 % d'oxygène,
- 0.9 % d'argon,
- 0.03 % de CO₂ et
- des traces d'autres gaz, avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et
- une mince couche d'ozone dans la stratosphère dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus durs.

L'essentiel des modifications subies par le rayonnement solaire se fait dans la troposphère par diffusion, diffraction, absorption, réfraction par des gaz de température et de densité croissante.

La masse gazeuse totale traversée est de 10 tonnes/m²; elle équivaut à 7.8 km d'atmosphère ramenée aux conditions de température et de pression dites normales: (T=0°C; p=1 013 mbar).

Si ces gaz étaient tous ramenés aux conditions normales, on aurait 6.2 km d'azote, 1.7 km d'oxygène, 74 m d'argon, 30 m de vapeur d'eau, 24 m de CO₂, 14 cm de Néon, 4 cm d'Hélium, quelques mm de Krypton, de méthane de NO et de NO₂ et seulement 5 mm d'ozone.

2- SOLAIRE THERMIQUE BASSE TEMPERATURE:

Les rayons du soleil, piégés par des capteurs thermiques vitrés, transmettent leur énergie à des absorbeurs métalliques - lesquels réchauffent un réseau de tuyaux de cuivre où circule un fluide caloporteur. Cet échangeur chauffe à son tour l'eau stockée dans un cumulus. Un chauffe-eau solaire produit de l'eau chaude sanitaire ou du chauffage généralement diffusé par un "plancher solaire direct".

Tous les dispositifs qui agissent comme capteurs solaires thermiques sont de plus en plus intégrés dans les projets d'architecture bioclimatique (maisons solaires, serres, murs capteurs, murs Trombe...).

Les capteurs solaires thermiques et les chauffe-eau solaires connaissent une croissance spectaculaire.

- Comment se chauffer grâce au soleil ?

L'énergie solaire peut servir à chauffer votre eau sanitaire grâce à un chauffe-eau solaire individuel (CESI), mais aussi alimenter un système ayant la double fonction de chauffage et de production d'eau chaude : le système solaire combiné (SSC), aussi appelé "combi". D'une façon générale, un chauffe-eau solaire couvre entre 40 et 80 % des besoins en eau chaude, et un SSC de 25 à 60 % des besoins en chauffage et en eau chaude.

- Comment fonctionne un chauffe-eau solaire ?

1.) À l'intérieur d'un capteur circule un réseau de tubes métalliques, thermiquement isolé et recouvert d'un corps noir pour absorber la chaleur. L'ensemble est surmonté par une plaque de verre pour créer l'effet d'une miniserre.

2.) Un circuit transporte le fluide caloporteur (eau et antigel) vers le ballon de stockage.

3.) La circulation du liquide peut être naturelle : il circule grâce à sa différence de densité avec l'eau du ballon. Tant qu'il est plus chaud, il s'élève. Le ballon doit alors être placé plus haut que les capteurs pour disposer d'un chauffe-eau en "thermosiphon". Mais la circulation peut aussi être "forcée" par un circulateur, une pompe électrique activée par un dispositif de régulation. Quand la sonde du ballon est plus chaude que celle des capteurs, la circulation est coupée, dans le cas contraire, la circulation reprend.

4.) À l'intérieur du ballon, un serpentin cède les calories à l'eau, le fluide refroidi repart vers le capteur pour un nouveau cycle.

3- SOLAIRE THERMIQUE HAUTE TEMPERATURE:

La concentration du rayonnement solaire sur une surface de captage permet d'obtenir de très hautes températures généralement comprises entre 400 °C et 1 000 °C.

La chaleur solaire produit de la vapeur qui alimente une turbine qui alimente elle-même un générateur qui produit de l'électricité.

Trois technologies distinctes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration: centrales héliio-thermodynamiques.

Dans les concentrateurs paraboliques, les rayons du soleil convergent vers un seul point, le foyer d'une parabole.

Dans les centrales à tour, des centaines voire des milliers de miroirs (héliostats) suivent la course du soleil et concentrent son rayonnement sur un récepteur central placé au sommet d'une tour.

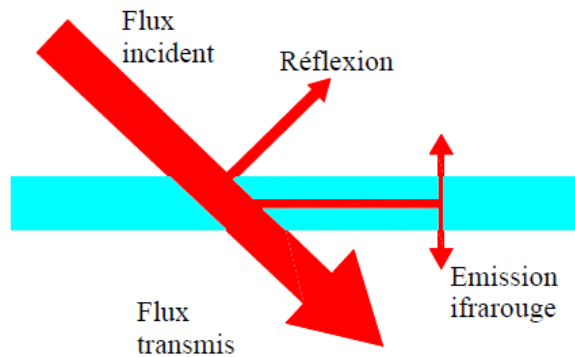
Troisième technologie : des capteurs cylindro-paraboliques concentrent les rayons du soleil vers un tube caloporteur situé au foyer du capteur solaire.

Attention, les systèmes solaires à concentration collectent uniquement le rayonnement solaire direct, alors que les capteurs solaires plans non concentrateurs et les modules photovoltaïques captent également le rayonnement diffus.

Après plusieurs années de sommeil la filière solaire haute température repart de plus belle. Une dizaine de projets de centrales hélio-thermodynamiques sont à l'étude ailleurs dans le monde : Mexique, Algérie, Iran, Afrique du Sud, Australie, Egypte, Israël, Maroc...

4- EXEMPLE DU SOLAIRE THERMIQUE: BASSE TEMPERATURE

Cas : Etude d'un capteur solaire plan

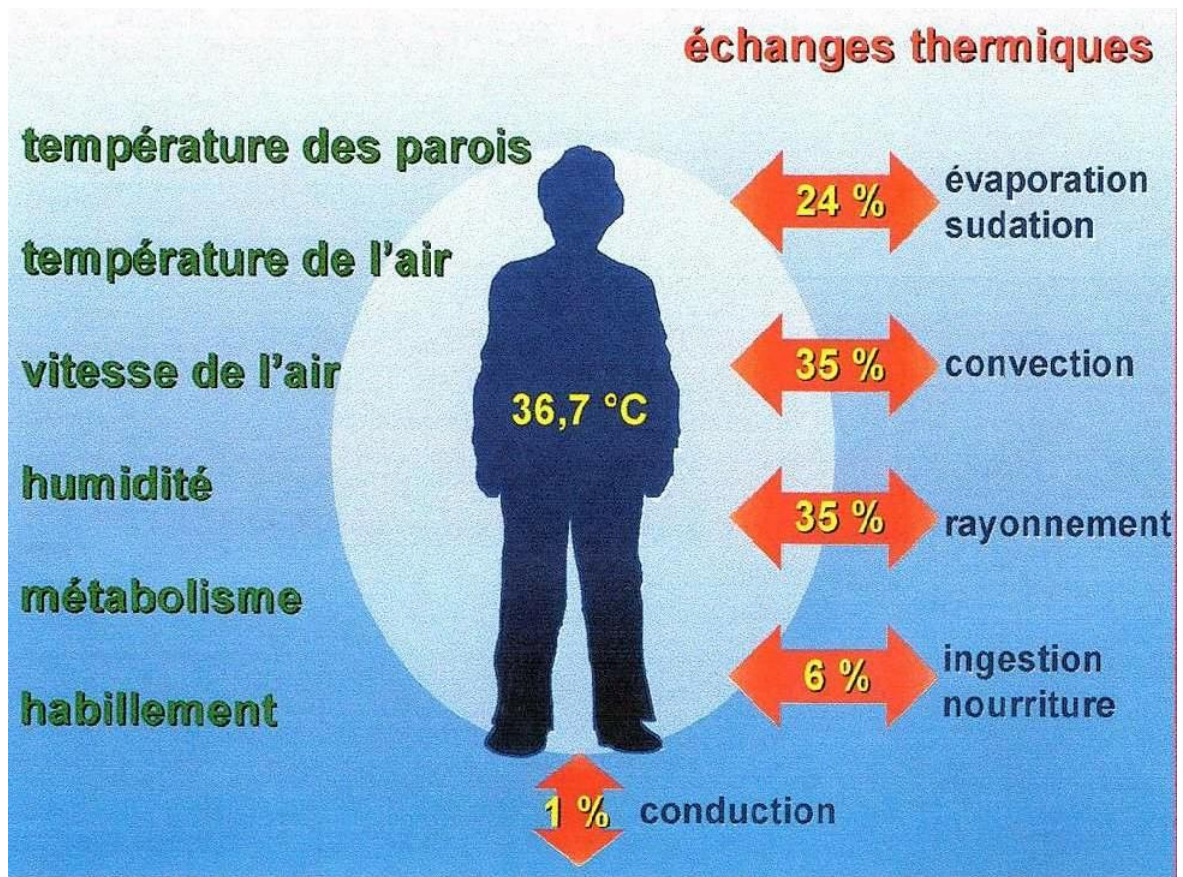
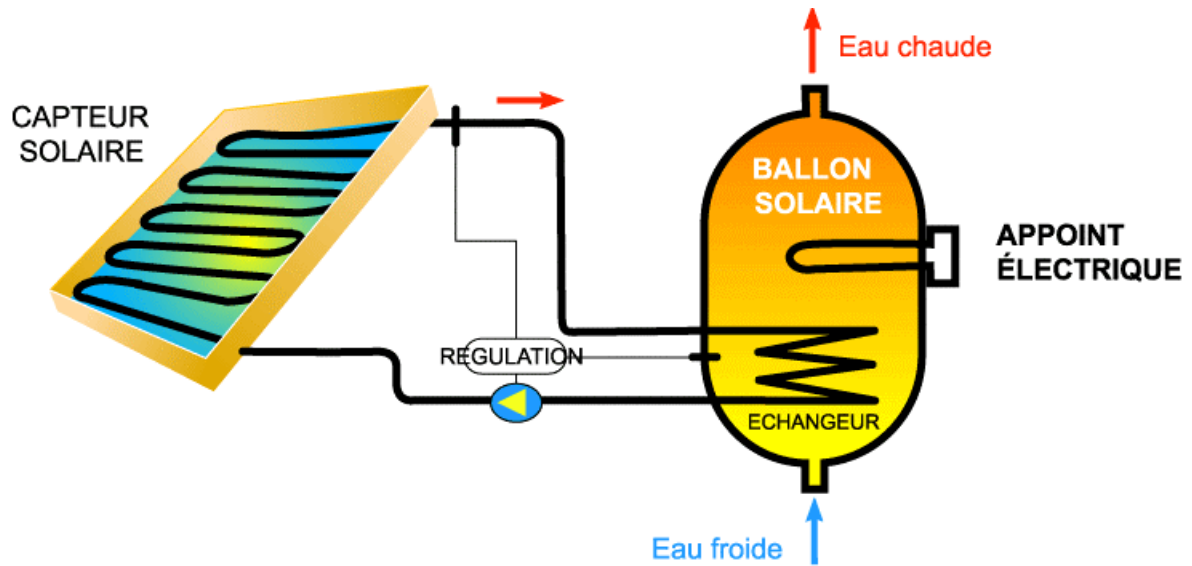


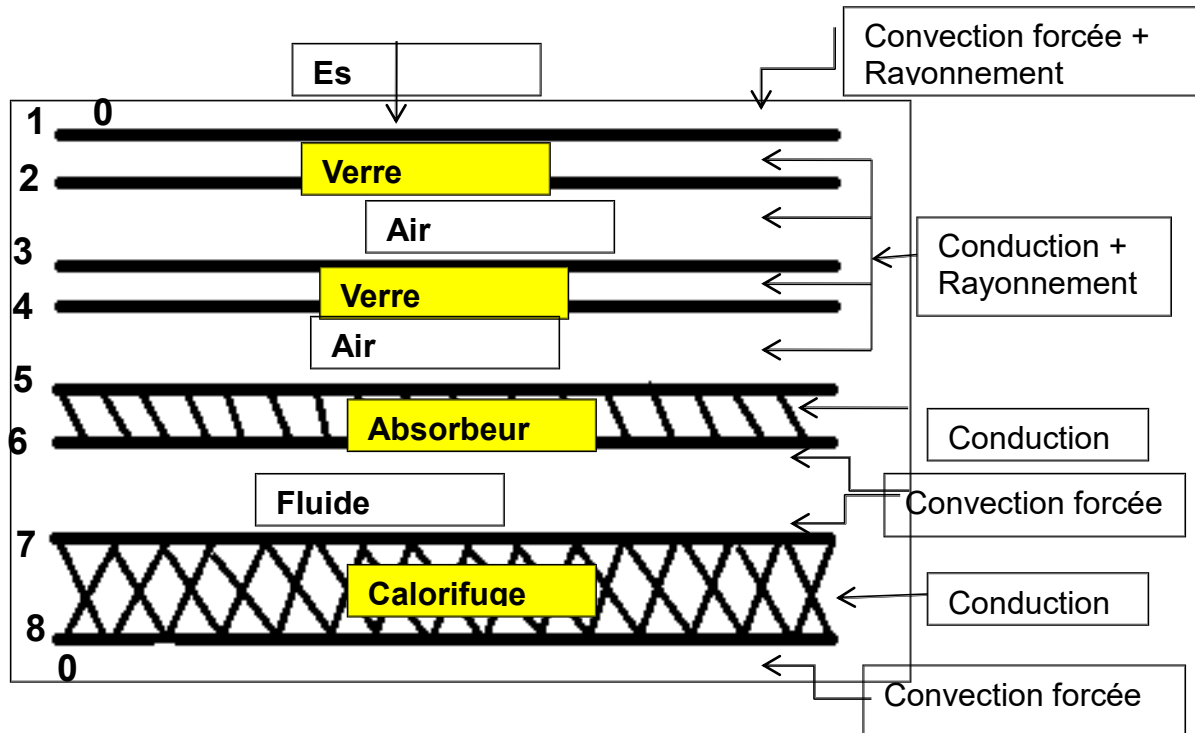
Le soleil est une des principales sources d'énergies renouvelable. Son rayonnement est un formidable vecteur d'énergie thermique. L'utilisation de cette énergie renouvelable est un bon moyen de lutter contre l'effet de serre et de s'inscrire dans les démarches actuelles de développements durables. Inépuisable, l'énergie solaire permet de respecter l'environnement et de préserver les ressources énergétiques. Elle est une source d'énergie gratuite à la disposition de tous.

Le chauffe-eau solaire thermique est sans nul doute une des plus belles technologies capables de capturer des énergies renouvelables... ».

L'objet de cette phase est de faire l'état des lieux pour la conception et le dimensionnement des installations d'ECS solaire.







Coupe longitudinale d'un Capteur solaire plan

a- Bilan énergétique : hypothèses

- On considère en première approximation que le capteur est plan et infini suivant Ox et Oy. La température est considérée comme uniforme dans tout plan xy perpendiculaire à Oz, en particulier le fluide caloporteur est caractérisé par une température uniforme T_F . Le capteur est exposé à l'atmosphère par les surfaces 1 et 8 : il échange de la chaleur par convection forcée avec l'air ambiant ; l'épaisseur des couches d'air est suffisamment faible pour que la convection naturelle ne s'y développe pas.
- L'éclairement E_s de la face du capteur est uniforme. ε_2 émissivité de l'absorbeur, corps opaque supposée indépendante de la direction et de la température. ε_1 émissivité du verre
- Le fluide reçoit, par l'intermédiaire de l'absorbeur, de l'énergie venant de l'extérieur au travers du double vitrage et perd de l'énergie par le calorifuge, celui-ci n'étant pas un isolant parfait.
- En comptant positivement les flux du bas vers le haut, la puissance thermique gagnée par le fluide (énergie à récupérer dans le capteur) est:

$$\Phi_f = -(\Phi_{6 \rightarrow 0} - \Phi_{0 \rightarrow 7})$$

$\Phi_{6 \rightarrow 0}$: le flux qui travers le système de la face 6 à 0

$\Phi_{0 \rightarrow 7}$: le flux qui travers le système de la face 0 à 7

Par unité de surface le flux gagné par le fluide caloporteur est :

$$\varphi_f = \varphi_{0 \rightarrow 7} - \varphi_{6 \rightarrow 0}$$

$\varphi_{6 \rightarrow 0}$: correspond au gain d'énergie au travers de l'absorbeur et du double vitrage.

$\varphi_{0 \rightarrow 7}$: correspond aux pertes par le calorifuge :

Pour le calcul de ces deux flux on note :

λ_a : conductibilité de l'air

λ_v : conductibilité du verre

λ_A : conductibilité de l'absorbeur

λ_F : conductibilité du fluide

λ_c : conductibilité du calorifuge

d_v : épaisseur du verre

d_A : épaisseur de l'absorbeur

d_c : épaisseur du calorifuge

$T_0, T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8$:

Température des surfaces

0,1,2,3,4,5,6,7,8

T_F : température du fluide

h_F : coefficient de transfert de chaleur par convection
forcée le fluide et la paroi 7

h : coefficient de transfert de chaleur par convection
forcée les parois 1 et 8 l'air(0)

b- Calcul du flux $\varphi_{0 \rightarrow 7}$

En régime stationnaire, le flux $\varphi_{0 \rightarrow 7}$ est constant (conservation du flux de chaleur qui traverse perpendiculairement des surfaces parallèles) et peut être calculé en différents sections droites en comptant positivement les flux du bas en haut:

- - entre la paroi 8 et l'air extérieur par convection forcée :

$$\varphi_{0 \rightarrow 7} = h(T_0 - T_8)$$

- - entre la paroi 7 et 8 (au sein du calorifuge) par conduction:

$$\varphi_{0 \rightarrow 7} = \frac{\lambda_c}{d_c}(T_8 - T_7)$$

- - entre le fluide et la paroi 7 par convection forcée :

$$\varphi_{0 \rightarrow 7} = h_F(T_7 - T_F)$$

En éliminant les deux température inconnues, T_7 et T_8 , on obtient:

$$T_0 - T_F = \varphi_{0 \rightarrow 7} \left(\frac{1}{h} + \frac{d_c}{\lambda_c} + \frac{1}{h_F} \right)$$

Expression qui permet de calculer le flux $\varphi_{0 \rightarrow 7}$ connaissant les températures T_0 et T_F

b- calcul du flux $\varphi_{6 \rightarrow 0}$

Comme pour les pertes d'énergie, le flux $\varphi_{6 \rightarrow 0}$ est constant et peut être calculé en chaque section droite caractéristique :

- Entre la paroi 6 et le fluide par convection forcée :

$$\varphi_{6 \rightarrow 0} = h_F (T_F - T_6)$$

- Dans l'absorbeur par conduction :

$$\varphi_{6 \rightarrow 0} = \frac{\lambda_A}{d_A} (T_6 - T_5)$$

- Dans l'air entre les parois 4 et 5 par conduction et rayonnement :

$$\varphi_{6 \rightarrow 0} = \frac{\lambda_a}{d_a} (T_5 - T_4) + \varphi^R$$

φ^R Flux radiatif, il se décompose en deux

- * le flux échangé entre les parois 4 et 5
- * le flux solaire

$$\text{Soit } \varphi^R = \varepsilon_2 \sigma (T_5^4 - T_4^4) - \varepsilon_1 E_S$$

Finalement

$$\varphi_{6 \rightarrow 0} = \frac{\lambda_a}{d_a} (T_5 - T_4) + \varepsilon_2 \sigma (T_5^4 - T_4^4) - \varepsilon_1 E_S$$

- Dans la vitre 3-4 par conduction + rayonnement:

$$\varphi_{6 \rightarrow 0} = \frac{\lambda_v}{d_v} (T_4 - T_3) - \varepsilon_1 E_S$$

- Dans l'air entre les parois 3 et 4 par conduction et rayonnement:

$$\varphi_{6 \rightarrow 0} = \frac{\lambda_a}{d_a} (T_3 - T_2) + \sigma (T_3^4 - T_2^4) - \varepsilon_1 E_S$$

- Dans la vitre 1-2 par conduction + rayonnement:

$$\varphi_{6 \rightarrow 0} = \frac{\lambda_v}{d_v} (T_2 - T_1) - \varepsilon_1 E_S$$

- entre la paroi 1 et l'air extérieur par convection forcée et rayonnement solaire:

$$\varphi_{6 \rightarrow 0} = h(T_1 - T_0) + \sigma (T_1^4 - T_0^4) - \varepsilon_1 E_S$$

On constate que les expressions de $\varphi_{6 \rightarrow 0}$ ne sont pas linéaires mais nous pouvons les rendre linéaires dans le cas de faible écart de température, soit en utilisant une relation de type:

$$\sigma(T_1^4 - T_2^4) \approx 4\sigma T_R^3(T_1 - T_2) = h_R(T_1 - T_2)$$

La température T_R est une température de référence, une moyenne entre la température de l'air ambiant et la température de fluide.

Les différentes expressions du flux $\varphi_{6 \rightarrow 0}$ s'écrivent :

$$\begin{aligned} \varphi_{6 \rightarrow 0} &= h_F(T_F - T_6) \\ &= \frac{\lambda_A}{d_A}(T_6 - T_5) \\ &= \left(\frac{\lambda_a}{d_a} + \varepsilon_2 h_R\right)(T_5 - T_4) - \varepsilon_1 E_S \\ &= \frac{\lambda_v}{d_v}(T_4 - T_3) - \varepsilon_1 E_S \\ &= \left(\frac{\lambda_a}{d_a} + h_R\right)(T_3 - T_2) - \varepsilon_1 E_S \\ &= \frac{\lambda_v}{d_v}(T_2 - T_1) - \varepsilon_1 E_S \\ &= (h + h_R)(T_1 - T_0) - \varepsilon_1 E_S \end{aligned}$$

- En éliminant les températures inconnues (T_6 à T_1) on obtient :

$$\begin{aligned} T_F - T_0 = \varphi_{6 \rightarrow 0} &\left\{ \frac{1}{h_F} + \frac{d_A}{\lambda_A} + \frac{1}{\frac{\lambda_a}{d_a} + \varepsilon_2 h_R} + 2 \frac{d_v}{\lambda_v} + \frac{1}{\frac{\lambda_a}{d_a} + h_R} + \frac{1}{h + h_R} \right\} \\ &+ \varepsilon_1 E_S \left\{ \frac{1}{\frac{\lambda_a}{d_a} + \varepsilon_2 h_R} + 2 \frac{d_v}{\lambda_v} + \frac{1}{\frac{\lambda_a}{d_a} + h_R} + \frac{1}{h + h_R} \right\} \end{aligned}$$

Expression qui permet de calculer $\varphi_{6 \rightarrow 0}$ connaissant les températures (T_F à T_0)

IV- LE DIMENSIONNEMENT DES EQUIPEMENTS SOLAIRES

1- Principes du dimensionnement

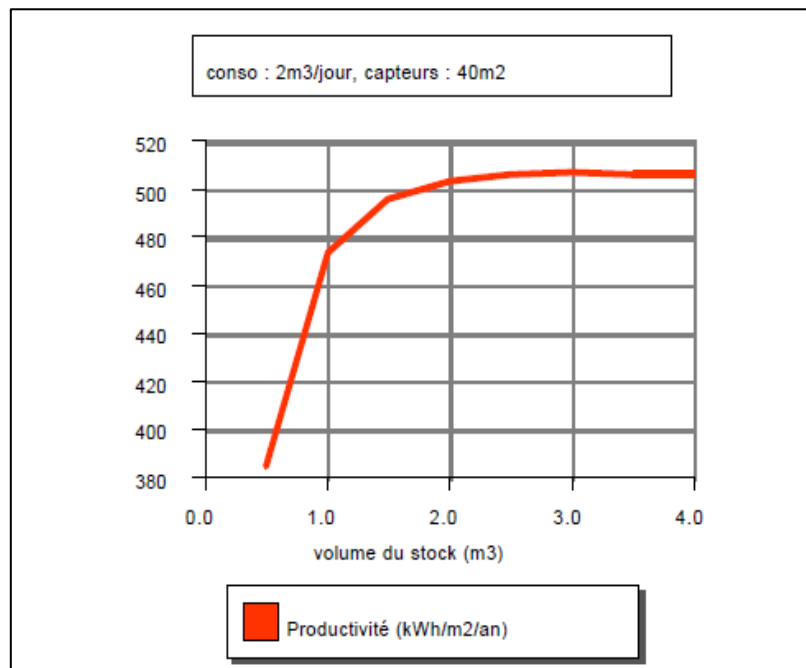
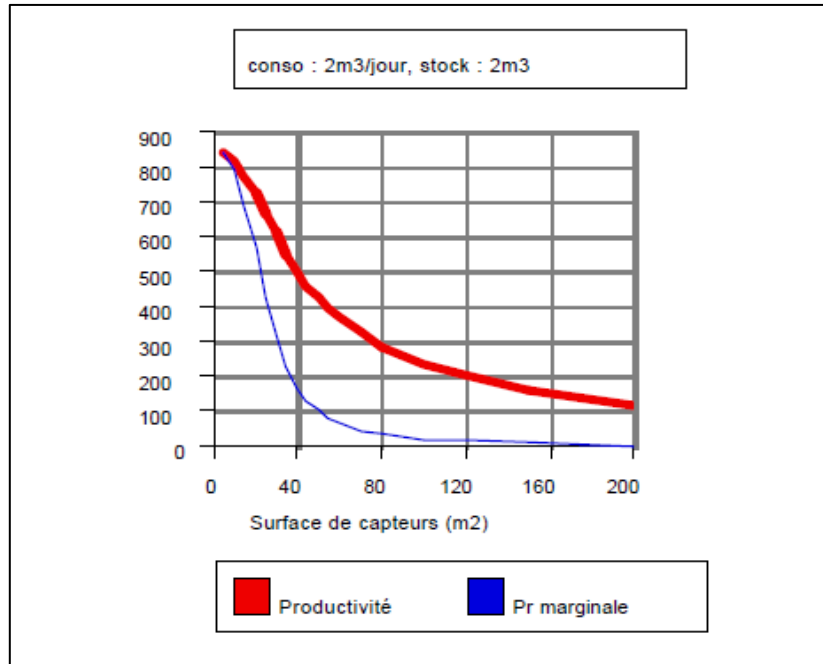
- Il n'est pas réaliste de vouloir couvrir 100 % des besoins d'eau chaude sanitaire en utilisant seulement l'énergie solaire.
- Une installation solaire sera donc toujours couplée avec un système appoint utilisant une autre source d'énergie : gaz, électricité...
- Le dimensionnement de l'appoint vise à assurer : le service en eau chaude en toutes circonstances. C'est un problème classique qui nécessite surtout une bonne évaluation des besoins.
- La meilleure répartition possible entre solaire et appoint. C'est un problème complexe qui nécessite l'utilisation d'outils de calcul spécifiques afin de produire un maximum d'énergie solaire à un coût compétitif.
- En effet, le coût du kWh produit dépend essentiellement de deux paramètres :
 - le coût de l'installation par m² de capteur,
 - la productivité de l'installation (production par m² de capteur et par an).
- Le coût de l'installation peut être approché par une formule relativement simple. En particulier, il dépend de façon quasi-linéaire de la surface des capteurs.
- La productivité des capteurs n'est par contre pas définissable de façon simple. Elle décroît quand la surface de capteurs croît : le dernier mètre carré de capteurs produit moins d'énergie que le premier. En conséquence, toute augmentation de la surface des capteurs au-delà de la taille optimale de l'installation entraîne une augmentation de la production solaire mais aussi une augmentation du coût du kWh produit.
- Le mauvais dimensionnement d'un des autres composants du système (stock, échangeur, circuits, régulation) peut pénaliser sensiblement cette productivité.

2- Exemple

- Cet exemple est destiné à illustrer l'influence du dimensionnement des capteurs et des autres composants, en examinant les résultats obtenus pour différents dimensionnements d'un système solaire destiné à répondre à des besoins ECS (Eau Chaude Sanitaire) définis par une consommation journalière constante : 2 000 litres/jour d'eau chaude à 45°.
- On définit d'abord une installation de référence qui fournit 80% des besoins, 20% étant couverts par l'appoint. Cette installation comporte 40 m² de capteurs et un stock de 2000 litres. Elle produit 20,2 MWh/an pour des besoins de 25 MWh/an. La

productivité moyenne des capteurs est relativement faible : 504 kWh/m² en raison du taux de couverture solaire élevé.

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



Variation de la productivité en fonction du dimensionnement des composants principaux

- La productivité des capteurs diminue avec la surface et la productivité marginale (celle du dernier capteur) est rapidement très faible :
 - le 1er m² de capteur fournit 850 kWh/an environ ;
 - le 20 ème m² fournit 500 kWh/an,
 - le 40 ème m² de capteur fournit 150 kWh/an environ ;
 - le 80 ème produit moins de 50 kWh,
 - au-delà de 100 m², les capteurs ne produisent quasiment rien.
- Les variations du stock ont peu d'influence au-delà de 2000 litres. Par contre, la présence d'un stock trop petit est très pénalisante :
 - un stock de 2000 litres donne une productivité de 500kWh/an environ,
 - un stock de 1000 litres donne une productivité de 475 kWh/an (-5%),
 - un stock de 500 litres donne une productivité de 400 kWh/an (-25%).
- Les résultats numériques seraient évidemment différents dans d'autres situations mais on retrouverait les mêmes tendances.

Nous avons donné les expressions qui permettent de calculer les flux

$$\varphi_{6 \rightarrow 0} \text{ et } \varphi_{0 \rightarrow 7}$$

Connaissant les températures (T_F à T_0)

Pour calculer par la suite le flux utile gagné par le fluide par unité de surface du capteur, c'est-à-dire extrait du capteur, soit:

$$\varphi_f = \varphi_{0 \rightarrow 7} - \varphi_{6 \rightarrow 0}$$

- De point de vue pratique ceci n'est pas commode et les constructeurs fournissent des données plus normalisées.

V- ÉVALUATION DE LA PRODUCTION ENERGETIQUE INSTANTANEE D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN.

1- Équation fondamentale

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

- Référence basée sur la température moyenne du fluide dans le capteur.
- Référence basée sur température d'entrée du fluide dans le capteur.

Evidement les deux écritures sont différentes:

- Cas référence basée sur la température moyenne dans le capteur:

$$P_u = S (B I - K (T_{fm} - T_e))$$

Avec :

- P_u : puissance utile (W/m^2)
- I : flux de rayonnement disponible sur le plan des capteurs (W/m^2)
- T_e : température ambiante ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{fm} : température moyenne du fluide dans les capteurs ($^{\circ}\text{C}$)
- S : surface des capteurs (m^2)
- B : coefficient caractéristique des gains du capteur (-)
- K : coefficient caractéristique des pertes du capteur ($\text{W/m}^2/^{\circ}\text{C}$)
-

2- Définition des coefficients caractéristiques

- En toute rigueur, les coefficients caractéristiques sont des variables dépendant des conditions régnant à un moment donné. En pratique, un capteur donné peut être caractérisé par un couple unique (B , K), qui figurent, par exemple, dans les avis techniques des capteurs commercialisés.
 - Le coefficient B est généralement compris entre 0,7 et 0,8 (à incidence normale).
 - Le coefficient K est généralement compris entre 4 et 10 $\text{W/m}^2/^{\circ}\text{C}$.
- Surface de capteur S

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

- la surface hors tout (S_{ht}) est à la surface supérieure du coffre du capteur,
- la surface utile, plus petite, est la surface d'entrée (S_e) du rayonnement (vitrage).

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

Par exemple:

- considérons un capteur X sous un ensoleillement de 800 W et une température extérieure de 20°C .
- On suppose que la température moyenne du fluide dans le capteur est de 60°C .

	S/B et K	S	B	K	calcule	P_u
Cas 1	Utile/utile	2.0	0.77	4.49	$2.0(0.77*800-4.49*40)= 1232-359$	873
Cas 2	Hors-tout/hors-tout	2.1	0.74	4.28	$2.1(0.74*800-4.28*40)= 1243-359$	884

On peut calculer la puissance utile dans 2 cas, suivant la référence (hors tout ou utile) utilisée pour S d'une part ; B et K d'autre part :

Un bon dimensionnement repose sur trois points :

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

Quels besoins ?

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

Quel climat ?

Quelles contraintes ?

Quels schémas ?

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

Quel dimensionnement ?

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

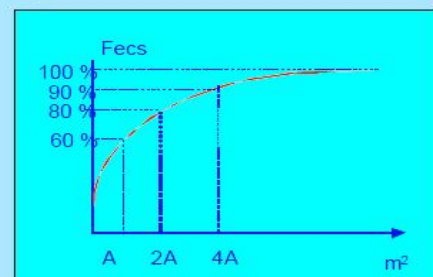
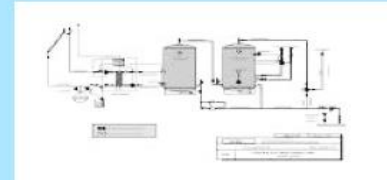
Quels matériels ?

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

Cahier des charges

Suivi et contrôle

Garantie de Résultats Solaires



- Le dimensionnement d'un capteur de production d'eau sanitaire peut faire l'objet d'un projet d'étude.
- Actuellement au Maroc il y a des standards industriels pour la fabrication et pour l'installation de ces capteurs.
