REPUBLIQUEALGERIENNEDEMOCRATIQUEETPOPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energie renouvelable en mécanique

Analyse du système de stockage de l'énergie solaire thermique issue d'un bassin solaire opérant autour de la température ambiante

---

Présenté par

Mr Moussa ATTARI

Mr Aiman DAMICHE

Proposé et Dirigé par

Dr Younes CHIBA

Dr Abdelkarim TERFAI

Promotion2021

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné

Le courage, la volonté et la patience pour réaliser ce travail.

Nous adressons nos remerciements à notre encadreur

Dr. Younes CHIBA et Dr Abdelkrim TERFAI

Pour sa grande disponibilité, ses encouragements, se critiques et ses Conseils qui ont contribué grandement à la réalisation de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous remercions nos parents, qui nous ont soutenus tout au long de nos études.

Que les enseignants d'Université Yahia Fares de Médéa, particulièrement nos enseignements

Du Département de mécanique, trouvent ici le témoignage de nos profonds

Remerciements et toute notre reconnaissance pour l'encadrement pédagogique que nous avons reçu.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce Modeste travail trouvent ici l'expression de

notre sincère

DIDICACE

C'est avec une grande émotion,
Je dédie ce modeste travail de fin d'étude :
A mes très chers parents qui ont toujours été là pour
Moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance.
J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.
A toute ma famille, pour leur soutien, sacrifice, patience, ainsi pour leurs conseils, que dieux les protèges et les entoure de bénédiction.
A tous mes amis, mes collègues, mon binôme moussa et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à réaliser ce travail.

DIDICACE

C'est avec une grande émotion,
Je dédie ce modeste travail de fin d'étude :
A mes très chers parents qui ont toujours été là pour
Moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance.
J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.
A toute ma famille, pour leur soutien, sacrifice, patience, ainsi pour leurs conseils, que dieux les protèges et les entoure de bénédiction.
A tous mes amis, mes collègues, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à réaliser ce travail.

Sommaire

Introduction Générale ----- 1
I.1- Introduction ----- 3
I.2- L'énergie solaire : ----- 3
I.2.1- Energie solaire photovoltaïque ----- 3
I.2.1.1- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque ----- 3
I.2.1.2- Les différentes technologies des cellules solaires ----- 4
a)- Silicium monocristallin ----- 4
I.2.1.3- Les caractéristiques ----- 6
I.2.1.3.1- Caractéristique courant-tension ----- 6
I.2.1.3.2- Caractéristique puissance-tension ----- 7
I.2.1.4- Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque ----- 7
I.2.1.4.1- Avantages ----- 7
I.2.1.4.2- Inconvénients ----- 8
I.2.2- Energie solaire thermique : ----- 8
I.3- Energie Eolienne ----- 8
I.3.1-Définition de l'énergie éolienne : ----- 8
I.3.2- Principe de fonctionnement d'une éolienne ----- 9
I.3.3- Configuration d'une station éolienne pour la production d'électricité ----- 10
I.3.3.1- Le multiplicateur ----- 10
I.3.3.2- La génératrice électrique ----- 10
I.3.3.3- Le dispositif de stockage ----- 11
I.3.3.4- Le dispositif de contrôle ----- 11
I.3.4- Différentes architectures de construction ----- 11
I.3.4.1- Éolienne à axe vertical ----- 11
I.3.4.2-Eolienne à axe horizontal ----- 12
I.3.5- les avantages et l'inconvénient de l'énergie éolienne ----- 13
I.3.5.1- les avantage ----- 13
I.3.5.2- les inconvénients ----- 13
I.4- Energie hydraulique ----- 13
I.4.1- Principe de fonctionnement ----- 13
I.4.2-Différents types de centrales ----- 14
I.4.2.1- Centrale au fil de l'eau : ----- 14
I.4.2.2- Centrales alimentées par un réservoir ----- 14
I.4.3- Taille des centrales ----- 15
I.5- Energie de la biomasse ----- 15
I.5.1- La Biomasse ----- 15
I.5.2- Principe de fonctionnement ----- 15

I.5.3- Les type de biomasse ---- 16
I.5.3.1- Biomasse sèche : ---- 16
I.5.3.2- Biomasse humide : ---- 16
I.5.4- Avantages et inconvénients de la biomasse ---- 16
I.5.4.1- Les avantages de la biomasse ---- 16
I.5.4.2- Les inconvénients de la biomasse ---- 16
I.6- Energie géothermique ---- 16
I.6.1- La géothermie ---- 16
I.6.2- Types de gisements géothermiques ---- 18
I.6.2.1- La géothermie à haute énergie ---- 18
I.6.2.2- La géothermie à moyenne énergie ---- 18
I.6.2.3- La géothermie à basse et très basse énergie ---- 18
I.7- Conclusion ---- 18
II.1- Introduction ---- 20
II.2- - Rayonnement solaire ---- 20
II.2.1- Rayonnement solaire diffus ---- 20
II.2.2 - Rayonnement solaire incident ---- 20
II.2.3 - Rayonnement solaire réfléchi ---- 20
II.2.4 - Rayonnement solaire absorbé ---- 21
II.3- Rayonnement Solaire à l'Extérieur de l'Atmosphère ---- 21
II.4- Mouvement de la Terre autour du Soleil ---- 21
II.5- Paramètres géographiques ---- 21
II.6- Déclinaison solaire ---- 22
II.7- Angle horaire ---- 23
II.8- Temps solaire vrai ---- 24
II.9- Coordonnées horizontales ---- 25
II.10- Hauteur du soleil ---- 25
II.11- Les modèles semi empiriques ---- 26
II.12- Modèle de Bird et Hulstrom ---- 27
II.13- Calcul du rayonnement direct ---- 28
II.14- Calcul du rayonnement diffus ---- 29
II.15- Calcul du rayonnement global ---- 31
II.16- Applications à basses et hautes températures ---- 31
II.16.1- Applications à basses températures ---- 31
II.16.2- Applications à hautes températures ---- 32
III.1-BASSIN D'EAU SOLAIRE ---- 34
III.1.1- Introduction ---- 34
III.1.2-PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ---- 34
III.1.2.1-DIFFERENT TYPES DE BASSIN SOLAIRE : ---- 35

III.1.2.1.1-BASSIN TRES PEU PROFONDS :---- 35
III.1.2.1.2-BASSIN AVEC UNE ZONE DE CONVECTION :---- 36
III.1.2.1.3-BASSIN DESTINE A LA PRODUCTION DE SEL : ---- 37
---- 37
III.1.2.1.4-BASSIN MUNIS DE STRUCTURES ANTIPERTES : ---- 38
III.1.2.1.5-ETANGS TOMBANTS : ---- 38
III.1.3-Equations de bilan thermique :---- 39
III.1.3.1-Équations du bilan énergétique pour le couvercle de verre supérieur : ---- 39
III.1.3.2-Équations du bilan énergétique pour le capot inférieur en verre ---- 41
III.1.3.3-Équation du bilan énergétique pour la plaque absorbante---- 42
III.1.3.4-Équation du bilan énergétique pour l'eau du bassin : ---- 43
III.2-RESERVOIR DE STOCKAGE---- 47
III.2.1-Stockage thermique de l'énergie---- 47
III.2.2 Types de stockage de l'énergie thermique ---- 49
III.2.2.1- Stockage thermique thermochimique: ---- 49
III.2.2.2Stockage par chaleur latente ---- 50
III.2.2.3-Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible ---- 52
III.2.2.4-Lit entassé de roches ---- 53
III.2.3-Comparaisons des différents types de stockage thermique : ---- 58
IV.1-Introduction ---- 61
IV.2-Les résultats et interprétations---- 61
Conclusion générale---- 71
Réf.

Liste de Figure

Figure.I.1- Fonctionnement d'une cellule PV 4
Figure.I.2- Cellule monocristalline 5
Figure.I.3- Cellule multi-cristallin 5
Figure.I.4 -Cellule amorphe 6
Figure .I.5-Courbe I =f(V) d'une cellule photovoltaïque. 6
Figure .I.6 -Courbe P=f(V) d'une cellule photovoltaïque. 7
Figure .I.7 -Constitution d'une éolienne 9
Figure .I.8 -Schéma d'une station de fourniture et de production D'énergie électrique par aérogénérateur……10
Figure .I.9 -Éolienne de type Darrieus à gauche, Savonius au milieu et Venturi à droite……12
Figure .I.10 -Eolienne à axe horizontal……12
Figure .I.11 -Principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques……14
Figure .I.12 -Centrale de Beauharmois au Québec : Puissance 1660 MW hauteur de chute 24 m……14
Figure .I.13 -Barrage de Tignes, le plus haut de France (160 m il retient 230 millions de m3)…15
Figure .I.14 -Le principe de la biomasse……...16
Figure .II.1 -Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour de l'année selon les deux formules proposées……24
Figure.II.2- Variation de l'angle horaire en fonction du temps……24
Figure.II.3- La différence entre le temps solaire vrai et le temps légal……25
Figure.II.4- Evolution de l'équation du temps……..26
Figure.II.5- Variation de la hauteur du soleil au cours d'une journée……...27
Figure.II.6- Composantes du rayonnement solaire calculé par le modèle de Bird&Hulstrom– Site : Médéa [26]……...27
Figure.II.7- Variation de la masse atmosphérique au cours d'une journée……...28
Figure.II.8- Variation de rayonnement solaire au cours du temps……34
Figure.III.1- Shema de fonctionnement d' bassin solaire……..35
Figure.III.2- Bassin d'eau solaire peu profond…… ……...35
Figure .III.3- Bassin d'eau solaire peu profond la production d'électricité……...36
Figure .III.4- Bassin d'eau solaire avec zone de convection……36
Figure .III.5- Bassin d'eau solaire destine a la production de sel……..37

Figure .III.6- Bassin d'eau solaire muni de structures anti pertes ……..……38
Figure .III.7- Etangs Toumants…….39
Figure.III.8-Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique. 48
Figure.III.9.Shema d'un réservoir contient de plaque solide……....48
Figure .III.10- Les différentes étapes de stockage de la chaleur par un matériau en fonction de la température…..……52
Figure.III.11- Les concepts de stockage de la chaleur sensible à haute température……54
Figure.III.12- Schéma de principe de fonctionnement d'une unité de stockage de lit entassé de roches…..……55
Figure.III.13- Stockage thermocline sur lit de roche [6]…..……...56
Figure.III.14- Echanges de chaleur dans un lit de roches [6]…..……56
Figure .III.15- Les différentes formes de stockage thermique [21]……..60
Figure.IV.1- variation horaire du rayonnement solaire et la température du fluide……61
Figure.IV.2-Evolution de la température de fluide caloporteur en fonction du temps pour les nœuds défferentes……62
Figure.IV.3- l'évolution de la température calculée du fluide caloporteur en fonction du temps avec une augmentation de la longueur de réservoir.....63
Figure.IV.4- l'évolution de la température de réservoir pour différents valeurs de débit massique en fonction de temps…….....64
Figure.IV.5-l'évolution de la température de fluide caloporteur en fonction du temps…..65
Figure.IV.6-l'evolution de la température de réservoir en fonction du temps pour défferentes nœuds. ……...66
Figure.IV.7-l'évolution de la température calculée de l'eau en fonction du temps avec une augmentation de la longueur du réservoir…….....67
Figure.IV.8-l'évolution de la température du fluide caloporteur avec le débit massique……...68
Figure.IV.9-l'évolution de la température calculée du réservoir en fonction du temps……..…69

Liste DE Tableau

Tableau.I.1: Classification des centrales d'après leur puissance 15
Tableau.II.1-Valeur du facteur Fc en fonction de la distance zénithale 27
Tableau.II.2.Coordonnées géographique de site utilisé.....31
Tableau.III.1.Coefficients de transmission de l'eau …….....42
Tableau.III.2 : Comparaison de l'air avec le Therminol VP1 et l'huile végétale de colza…..57
Tableau.III.3.Caractéristiques des différents systèmes de stockage de la chaleur…….....58

Liste des symboles

A	Surface	m^2
A_t	Section transversale	m^2
a_z	Azimut du soleil	°
C_p	Chaleur spécifique	J/ Kg K
D	Diamètre	m
D_i	Différence de temps	heure
E_T	La correction de l'équation des temps	min
g	Accélération due à la pesanteur	m/s^2
h	Hauteur du soleil	°
h_c	Coefficient de transfert de chaleur convectif	W/m2K
h_R	Coefficient de transfert thermique radiatif	W/m2K
I_0	Constante solaire	W/m^2
I_{sc}	La constante solaire corrigée	W/m^2
I_T	Rayonnement solaire global	W/m2
K	Conductivité thermique	W/mK
L	L'épaisseur d'ozone réduite	cm
L	Longueur	m
Lon	Longitude	°
L_T	Temps légal	heure
m_a	Masse d'air	–
m_r	Masse d'air optique relative	–
m_w	Masse de l'eau de l'étang	Kg
$\dot{m}_f$	Débit massique	Kg/s

N	Numéro du jour de l'année à partir du 1er janvier	–
Nu	Numéro de Nusselt	–
p	Numéro de Grashof	–
p	Périmètre	m
p	Pression atmosphérique	mbar
P_0	Pression atmosphérique au niveau de la mer	mbar
Pr	Numéro de Prandtl	–
Ra	Numéro de Rayleigh	–
T	Température	K
T_{ST}	Heure solaire vraie	heure
V	vitesse du vent	m/s
X	Épaisseur	m
X_W	Épaisseur d'eau condensée corrigée	cm
α	Diffusivité thermique	m^2/s
α	Absorptivité	–
α_0	Transmission de l'absorption d'ozone.	–
α_W	Absorption de vapeur d'eau	–
β	Coefficient de température	1/K
δ	Déclinaison solaire	◦
ε	Émissivité	–
η	Efficacité	%
θ_Z	Distance zénithale	◦
v	viscosité cinématique	m^2/s
ρ	Densité de masse	Kg/m3
ρ'_S	Albédo du sol	–
σ	Constante de Stefan Boltzmann	W/m^2K^4
τ	Transmissivité	–

φ	Latitude	°
φ	Fraction volumique	%
ψ_i	Part de rayonnement solaire	–
ω	Angle horaire	°

a	ambient
c	couverture
g	verre
is	isolation
nf	nano fluide
he	échangeur de chaleur
s	ciel
w	l'eau
SSP	Bassin solaire peu profond

ملخص

الهدف من مشروعنا الماستر هو اقتراح نموذج عددي لتخزين الطاقة الشمسية الحرارية من الحوض الشمسي الضحل .لهذا الغرض ، قمنا بأخذ معادلات الطاقة بعين الاعتبار من أجل توصيف انتقال الحرارة بين المادة الصلبة والسائل المنقول في خزان التخزين .كما قمنا بتحليل النتائج التي تم الحصول عليها ومناقشتها في حالة التكوين على شكل لوحات متوازية في خزان التخزين.

الكلمات المفتاحية: دراسة عددية ، تخزين ، طاقة شمسية حرارية ، لوحات متوازية.

Résumé

L'objectif de notre projet de Master est de proposer un modèle numérique de stockage de l'énergie solaire thermique issue d'un bassin solaire peu profond. Pour ce faire, les équations de l'énergie sont considérées pour caractériser le transfert de chaleur entre le matériau solide et le fluide caloporteur dans le réservoir de stockage. Les résultats obtenus sont analysés et discutés dans le cas d'une configuration sous forme des plaques parallèles dans le réservoir de stockage.

Mots-clés : Etude numérique, stockage, Energie solaire thermique, Plaques parallèles.

Abstract

The objective of our Master project is to propose a digital model for the storage of thermal solar energy from a shallow solar pool. To do this, the energy equations are considered to characterize the heat transfer between the solid material and the coolant in the storage tank. The results obtained are analyzed and discussed in the case of a configuration in the form of parallel plates in the storage tank.

Keywords: Numerical study, storage, thermal solar energy, parallel plates.

Introduction Générale

L'énergie solaire est l'une des énergies renouvelables qui a été et continue d'être l'objectif principal de beaucoup d'ingénieurs et de chercheurs depuis les deux dernières décennies inciter par les perturbations des prix des énergies fossiles et favorisée par les avantages environnementaux ainsi que les multiples domaines d'applications parmi eux les systèmes solaires à chauffage d'eau.

En Algérie, la production de l'eau chaude sanitaire est généralement assurée par l'énergie conventionnelle (gaz naturel, résistance électrique etc.), dont les principaux systèmes utilisés pour le chauffage de l'eau, sont le chauffe-eau individuel à gaz, la chaudière pour le collectif, ou le cumulus électrique.

La production de l'eau chaude sanitaire par voie solaire est l'une des techniques d'exploitation, la plus répandue de l'énergie solaire. Les installations d'eau chaude sanitaire sont toutes munies de bassin solaires ou évacués. Equipements indispensables pour la conversion de l'éclairement solaire en énergie calorifique, véhiculée par un fluide caloporteur vers l'utilisation [1].

Le but de ce travail est la détermination des performances thermiques du stockage d'un d'bassin solaire raccordé avec réservoir de stockage à eau associé avec des plaques plane parallèles. Notre manuscrit de Master est structuré comme suit ;

Le premier chapitre porte sur différentes technologies des énergies renouvelables ; les systèmes solaires photovoltaïques, l'énergie éolienne, l'hydroélectricité, la biomasse et la géothermie.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur L'énergie solaire thermique et les rayonnements solaires et gisement solaire.

Le troisième chapitre est destiné à la modélisation mathématique de stockage thermique et bassin solaire peu profond.

Le quatrième chapitre présent les principaux résultats obtenus et leurs discussions dans ce travail.

Enfin notre manuscrit est terminé par une conclusion générale.

Chapitre 1

L’énergie renouvelable

I.1- Introduction

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité.

Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaire.

Les chocs pétroliers successifs depuis les années 70 ont démontré les risques économiques et géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les réserves sont mal réparties et épuisables. Et la solution proposée a concerné le renforcement du nucléaire émergeant. Cependant, si l'option électronucléaire a suscité après son lancement de grands espoirs, la réalité s'est révélée beaucoup moins rose [3].

Une bonne partie des pays industrialisés utilisant cette technologie ont décidé l'arrêt définitif de la construction des centrales nucléaires.

De plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques conventionnels dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès.

I.2- L'énergie solaire :

I.2.1- Energie solaire photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle ne la nuit.

I.2.1.1- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur,

générant ainsi des paire électron-trou qui peuvent contribuer au transport du courant(photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarisé Si on illumine maintenant une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraîné dans les zones neutres de chaque côté de la jonction.

Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension) ; s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque [3].

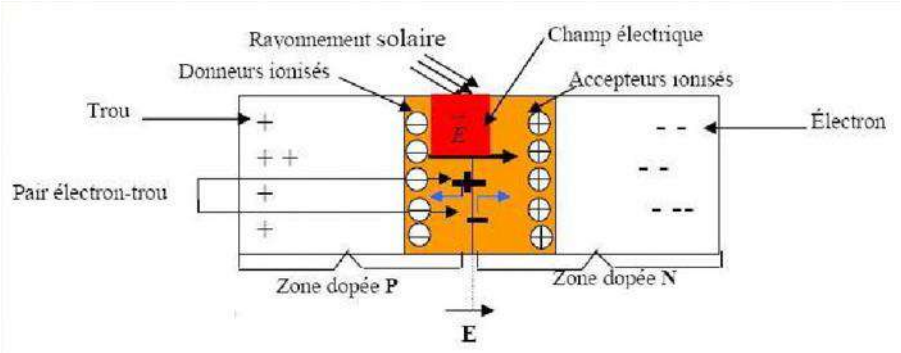


Figure I.1. Fonctionnement d'une cellule PV [3]

I.2.1.2- Les différentes technologies des cellules solaires

a)- Silicium monocristallin

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme « cristallin» implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'ya aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes [4].



Figure I.2. Cellule monocristalline [4]

b)- Silicium multi-cristallin (poly-cristallin)

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commerciale s'étend entre 10 et 14 % [4].

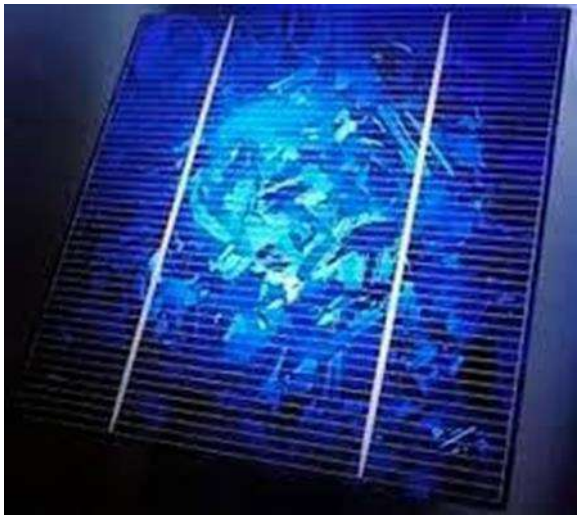


Figure I.3. Cellule multi-cristallin [4]

c)-Silicium amorphe (a-si)

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi- conduction.

Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre, son rendement de conversion est faible (de 7 à 10%) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [4].

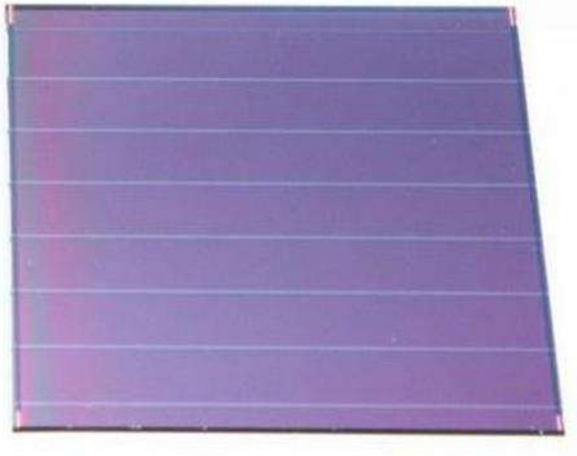


Figure.I.4. Cellule amorphe [4]

I.2.1.3- Les caractéristiques

I.2.1.3.1- Caractéristique courant-tension

La figure ci-dessous représente la courbe I= f(V) d'une cellule photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

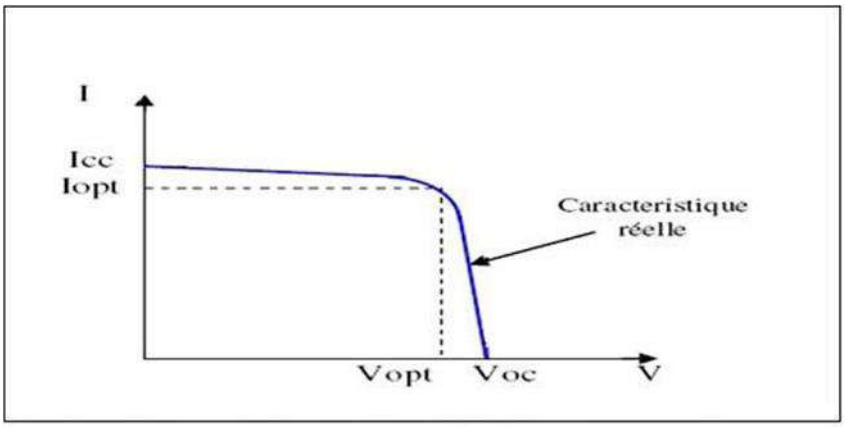


Figure.I.5. Courbe I =f(V) d'une cellule photovoltaïque [5].

I.2.1.3.2- Caractéristique puissance-tension

La puissance délivrée par la cellule a pour expression P = V.I. Pour chaque point, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe P = f(V). Figure (I.6).

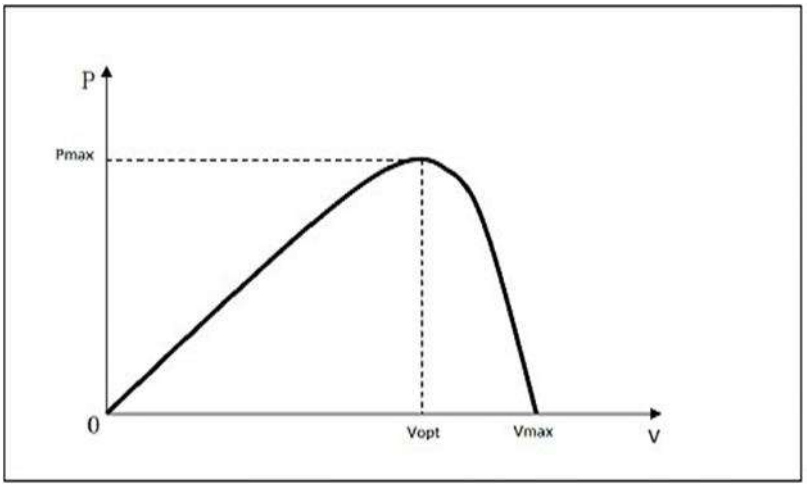


Figure I.6. Courbe P=f(V) d'une cellule photovoltaïque [5].

I.2.1.4- Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

I.2.1.4.1- Avantages

Les avantages de l'électricité solaire photovoltaïque sont multiples :

- ✓ La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- ✓ L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains pour sa petite relative taille, et son opération silencieuse.
- ✓ La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- ✓ L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- ✓ Modulaires, ses composants se prêtent à une utilisation innovante et esthétique en matière d'intégration architecturale (implantés sur ou en éléments de toiture ou de façade, sous forme de brise-soleil, en verrière…)
- ✓ L'électricité solaire photovoltaïque a pour qualité sa fiabilité, la durée de vie des capteurs supérieure à 25 ans, son autonomie, son faible impact sur l'environnement.

- ✓ Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible, car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

I.2.1.4.2- Inconvénients

- ✓ Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- ✓ Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques et des capteurs est élevé.
- ✓ S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- ✓ Le rendement électrique diminue avec le temps (20 % de moins au bout de 20 ans).
- ✓ Pollution à la fabrication

I.2.2- Energie solaire thermique :

L'énergie solaire thermique est dérivée du rayonnement du soleil qui augmente la température d'un corps exposé sous ce rayonnement. Cette source d'énergie est connue depuis très longtemps et utilisée dans la vie quotidienne. L'énergie solaire est essentiellement utilisée pour le chauffage de l'eau, de l'air, ou d'un bâtiment tout entier. Côté technique, deux méthodes sont appliquées pour transformer le rayonnement solaire en énergie thermique :

- ➢ Soit en concentrant et en collectant la chaleur grâce à des panneaux noirs.
- ➢ Soit en concentrant les rayons en un seul endroit.

Le principal intérêt de l'énergie solaire thermique, c'est sa simplicité : les panneaux destinés au chauffage sont simples, solides, résistants et durables.

I.3- Energie Eolienne

I.3.1-Définition de l'énergie éolienne :

Une éolienne est un capteur de vent dont la force actionne les pales d'un rotor. L'énergie mécanique produite par la rotation des pales est transformée en énergie électrique. L'éolienne se compose d'un mât (de 10 à 100 m de haut) sur lequel est installée une nacelle renfermant la génératrice électrique qui est entraînée par un rotor de 2 ou 3 pales mesurant entre 5 et 80 m de diamètre. Une éolienne de forte puissance nécessite de solides fondations. Sa durée de vie est de 20 ans environ [6].

I.3.2- Principe de fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes permettent de transformer l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.
La très large majorité des éoliennes installées dans le monde sont des machines à axe horizontal (1, 2 ou 3 pales verticales), car leur rendement est supérieur à celui des autres types d'éoliennes.

1- automate

2- anémomètre, girouette

3- moteur d'orientation

4- arbre lent

5- multiplicateur

6- arbre rapide

7- génératrice 8- rein à disque

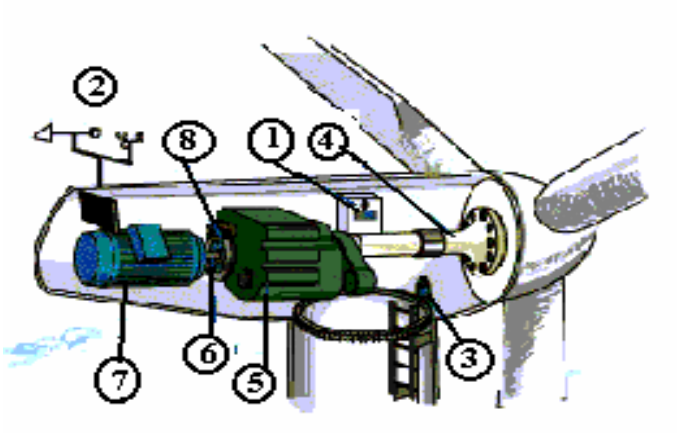


Figure I.7. Constitution d'une éolienne [6]

Lorsque le vent devient suffisant (3 à 5 m/s), l'automate (1) de la figure I.8, renseigné par l'anémomètre et la girouette (2) fixés au sommet de la nacelle, commande au moteur d'orientation (3) de placer l'éolienne face au vent. Le vent entraîne les pales qui font tourner un arbre lent (4). Le multiplicateur (5) augmente la vitesse de rotation et imprime cette accélération à l'arbre rapide (6). Celui-ci transmet le mouvement rotatif au générateur (7) qui produit de l'énergie électrique.

Les éoliennes de puissance ne fonctionnent et ne produisent pas en permanence. Elles ont besoin d'une vitesse de vent minimale pour commencer à produire de l'énergie Inversement, elles se freinent puis s'arrêtent automatiquement lorsque la vitesse du vent est trop élevée (environ 100 Km/h) Ainsi, les aérogénérateurs ne produisent de l'électricité qu'entre deux vitesses de vent appelées 'vitesse de démarrage' et 'vitesse de coupure'.

Pour freiner la rotation des éoliennes, on utilise souvent le principe de pales à pas variable ou 'pitch control' : les pales sont mobiles autour de leur axe longitudinal et s'orientent automatiquement de façon à diminuer la portance au vent. Lorsque la vitesse du vent est trop importante et que ce mécanisme ne suffit plus à freiner le mouvement rotatif, l'éolienne se

place perpendiculairement au vent (on dit qu'elle se met en drapeau, comme les voiles d'un bateau). Le rotor devient ainsi immobile.

Un autre système de régulation, appelé ''stall control' est également parfois utilisé: c'est alors le profil aérodynamique de la pale qui permet à l'éolienne de réguler [7].

Les éoliennes disposent en outre d'un frein mécanique (8), dit frein d'urgence, (figure I.8). Celui-ci, placé sur l'arbre rapide, permet de suppléer le freinage par les pales en cas de défaillance, ou bien de maintenir l'éolienne en position arrêtée en période de maintenance.

I.3.3- Configuration d'une station éolienne pour la production d'électricité

Toutes les stations éoliennes destinées à la production d'énergie électrique ont une configuration qui correspond à l'organigramme de la figure I.8. [7]

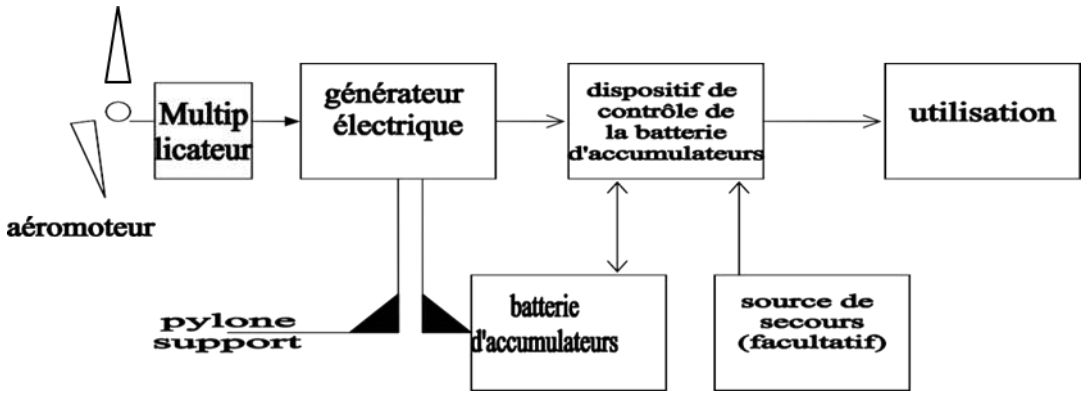


FIGURE I.8. Schéma d'une station de fourniture et de production d'énergie électrique par aérogénérateur [7]

I.3.3.1- Le multiplicateur

Le multiplicateur est un convertisseur de puissance. Il multiplie la vitesse d'entrée (rotor de l'éolienne) pour atteindre la vitesse de sortie exigée par la génératrice électrique.

I.3.3.2- La génératrice électrique

La génératrice électrique transforme l'énergie mécanique en une énergie électrique. Les génératrices des éoliennes diffèrent un peu des autres types de génératrices raccordées au réseau électrique. Une des raisons pour cette différence est que la génératrice d'une éolienne doit pouvoir fonctionner avec une source de puissance (c'est-à-dire le rotor de l'éolienne) qui fournit une puissance mécanique (un couple) très fluctuante.

La génératrice peut être soit synchrone, soit asynchrone. Elle produit du courant alternatif à fréquence variable et le courant alternatif à fréquence variable n'est pas utilisable dans le

réseau électrique public. Par conséquent, il faut d'abord le convertir en courant continu. La conversion de courant alternatif à fréquence variable en courant continu est réalisée par l'emploi de redresseurs. Ce courant est ensuite convertit en courant alternatif à fréquence fixe, puis filtré dans le cas d'un raccordement au réseau.

I.3.3.3- Le dispositif de stockage

La caractéristique essentielle du vent est sa discontinuité dans le temps, un certain nombre d'études ont eu pour objet de mettre au point des systèmes permettant de stocker l'énergie produite par le vent et non utilisée, afin de l'utiliser pendant les périodes de calme.

Les systèmes de stockages les plus utilisés sont les batteries d'accumulateurs au plomb.

I.3.3.4- Le dispositif de contrôle

Un système de régulation et de contrôle est nécessaire pour protéger les batteries des surcharges et décharges profondes.

I.3.4- Différentes architectures de construction

Nous classifions généralement, les capteurs éoliens par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. Les éoliennes se subdivisent en éoliennes mécaniques utilisées par exemple pour le pompage de l'eau, et en aérogénératrices qui fournissent de l'électricité stockée dans des batteries.

Il trouve deux architectures principales d'éoliennes sont [8]:

- ✓ L'éolienne à axe Vertical
- ✓ L'éolienne à axe Horizontal

I.3.4.1- Éolienne à axe vertical

Les pales de l'éolienne à axe vertical tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique (Figure (I.10)). Elle peut capter des vents plus faibles ce qui lui permet d'être plus fréquemment exploitée.

Elle demande moins d'espace qu'une éolienne à axe horizontal. Elle s'adapte donc mieux aux bâtiments et peut fonctionner quel que soit le sens du vent, par contre, elle produit moins d'électricité que l'éolienne à axe horizontal [8].



Figure I.9. Éolienne de type Darrieus à gauche, Savonius au milieu et Venturi à droite [8]

I.3.4.2-Eolienne à axe horizontal

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes, faites de voiles tendues sur une structure habituellement en bois, qui ont été ensuite remplacées par des éléments ressemblant fortement à des ailes d'avion figure (I.10).

Ces ailes qui sont placées dans le vent ne servent pas ici à sustenter un avion mais elles servent à générer un couple moteur destiné à entraîner un dispositif mécanique tel qu'une génératrice électrique, une pompe... etc [8].

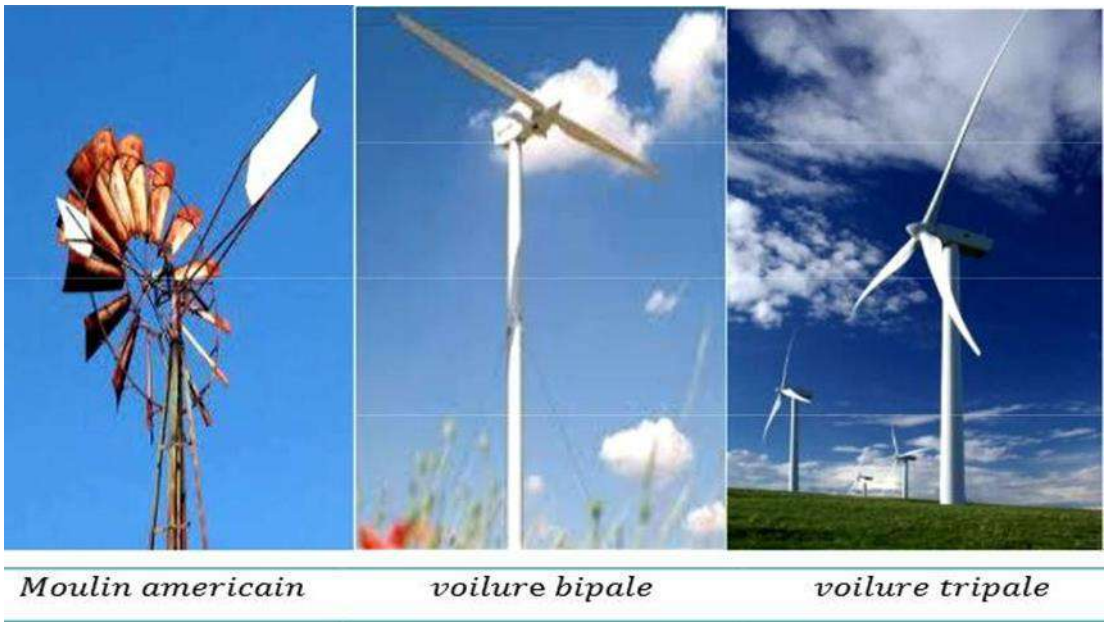


Figure I.10. Eolienne à axe horizontal [8]

I.3.5- les avantages et l'inconvénient de l'énergie éolienne

I.3.5.1- les avantage

Pollution zéro, elle peut être complémentaire aux filières traditionnelles, elle ne consomme pas de combustibles, abondante, elle permet que le terrain occupé par les parcs éoliens soit utilisé à d'autres fins, par exemple agricoles, elle compte parmi les systèmes de production d'énergie électrique les plus sûrs, bonne vie utile des appareils.

I.3.5.2- les inconvénients

Instable, elle est soumis à des variations du vent et à des périodes de calme, difficulté de stockage de l'énergie, les équipements sont chers et produisent du bruit, impact visuel [10].

I.4- Energie hydraulique

I.4.1- Principe de fonctionnement

L'énergie d'un cours d'eau ou d'une chute d'eau fait tourner une petite turbine (une hélice) qui crée de l'énergie mécanique, convertie par un alternateur en électricité.

La puissance et l'énergie produite dépendent du débit et de la hauteur de chute. Le cours d'eau doit donc garder un débit minimum quelle que soit la saison pour assurer une production d'électricité même en période d'étiage.

Dans la majorité des cas, une partie du cours d'eau est dérivée par un canal d'amenée pour obliger l'eau à passer dans la turbine. Si le débit est trop faible, il est possible de stocker l'eau dans un réservoir tampon et d'ouvrir les vannes du canal d'amenée quelques heures par jour. La production d'électricité peut être donc continue ou discontinue en fonction des ressources hydrauliques.

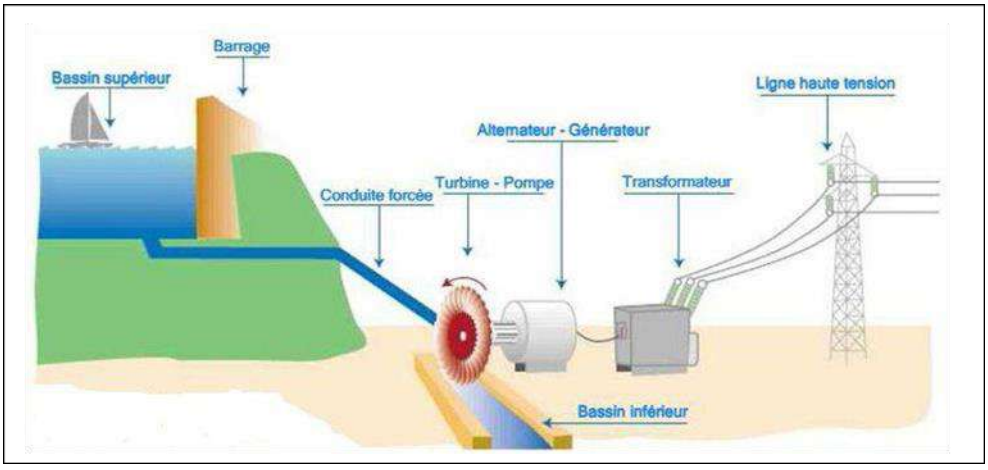


Figure I.11. Principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques [10]

I.4.2-Différents types de centrales

Nous distinguons deux types de centrales hydroélectriques : les centrales au fil de l'eau et les centrales alimentées par un réservoir.

I.4.2.1- Centrale au fil de l'eau :

Il s'agit d'une centrale installée directement dans le lit de la rivière et qui ne possède pas de réservoir. Le débit turbiné correspond au débit naturel du cours d'eau. La puissance produite varie uniquement avec ce débit.



Figure I.12. Centrale de Beauharmois au Québec : Puissance 1660 MW hauteur de chute 24 m [11]

I.4.2.2- Centrales alimentées par un réservoir

Il s'agit d'une centrale alimentée par une retenue d'eau permettant un stockage d'eau saisonnier ou interannuel. Le réservoir permet de moduler le débit d'eau et offre donc une souplesse pour répondre aux variations de la demande d'électricité.



Figure I.13. Barrage de Tignes, le plus haut de France (160 m il retient 230 millions de m^3) [10]

I.4.3- Taille des centrales

La classification se fait aussi par quantité d'électricité produite.

Tableau.I.1: Classification des centrales d'après leur puissance**[10]**

Centrales	Puissance
Grande	P>10MW
Petite Moyenne	10MW>P>1MW
Mini petite	1MW>P>10kW
Micro	P<10kW

I.5- Energie de la biomasse

I.5.1- La Biomasse

La biomasse, c'est l'ensemble des matières organiques (végétales et animales) existant sur Terre.

I.5.2- Principe de fonctionnement

Ce concept s'applique aux produits organiques végétaux et animaux utilisés à des fins énergétiques ou agronomiques

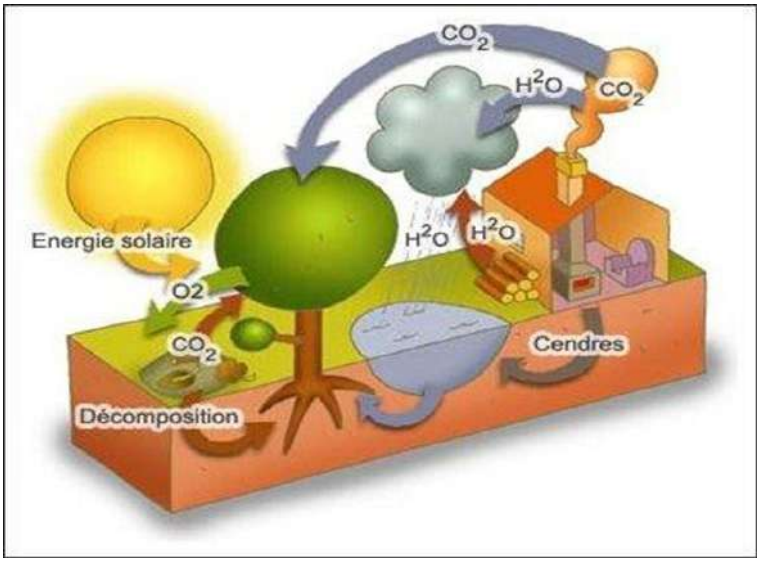


Figure I.14. Le principe de la biomasse [12]

I.5.3- Les type de biomasse

I.5.3.1- Biomasse sèche :

Le bois de feu est la plus ancienne source d'énergie. Les divers déchets ligneux constituent la biomasse sèche et sont également appelés « bois énergie »

I.5.3.2- Biomasse humide :

Les déchets organiques d'origine agricole (fumiers, lisiers…), agroalimentaire ou urbaine (déchets verts, boues d'épuration, fraction fermentescible des ordures ménagères…) constituent la biomasse « humide », qui peut être transformée en énergie ou en engrais/amendement.

I.5.4- Avantages et inconvénients de la biomasse

I.5.4.1- Les avantages de la biomasse

Le plus grand avantage de l'énergie de la biomasse, c'est qu'elle est renouvelable les plantes et les arbres peuvent être cultivés afin d'être utilisés.

Un autre avantage majeur de la biomasse est qu'elle aide à la gestion des déchets solides. Chaque jour, des millions de tonnes de déchets solides sont produits, dont notamment les déchets biodégradables. Lorsque les déchets sont utilisés comme biomasse, on répond à deux demandes : la baisse de la pollution et l'augmentation des ressources énergétiques.

I.5.4.2- Les inconvénients de la biomasse

Par rapport aux combustibles fossiles, l'énergie de la biomasse est très chère. C'est avant tout dû au coût de la recherche. Avec le temps et les avancées techniques, l'énergie de la biomasse devrait être plus abordable.

Ensuite, il est important de distinguer les différentes sources de biomasse. Certains procédés de combustion, notamment avec le bois sont de forts producteurs de CO2, donc aussi nocifs que les énergies fossiles.

Certaines sources, bien que dites « renouvelables » nécessitent une gestion raisonnée. C'est le cas des forêts. Une sur utilisation de la biomasse ligneuse augmenterait le phénomène de déforestation croissante et est considérablement nuisible pour l'équilibre environnemental naturel [14].

I.6- Energie géothermique

I.6.1- La géothermie

La géothermie, du grec géo(la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui

vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur [8].

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre, ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte charger de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité

L'énergie géothermique est localement exploitée pour chauffer ou disposer d'eau chaude depuis des millénaires, par exemple : en Chine, dans la Rome antique et dans le bassin méditerranéen.

La géothermie s'intéresse à l'étude des phénomènes thermiques de la terre qui sont liés à la formation et à la composition du globe. La terre est chaude. La chaleur terrestre qui se propage à travers la croûte continentale (appelé flux de chaleur) n'est pas homogène; le flux de chaleur varie donc d'un endroit à un autre.

En présence d'un flux de chaleur élevé, les eaux souterraines se réchauffent et se transforment en eau thermale. Les eaux deviennent chaudes et remontent en surface sous différentes formes. Ces formes peuvent êtres :

Geysers : Dans les pays volcaniques, l'eau bouillante jaillit à la surface sous forme de jets atteignant jusqu'à 50 m de haut. Exemple : Les geysers d'Islande, de Nouvelle- Zélande ou de Californie.

- ✓ Fumerolles: Ce sont des fentes à partir desquelles des gaz volcaniques, la plupart du temps vapeur d'eau, s'échappent vers l'atmosphère. Exemple: Fumerolles en Italie à Larderello.
- ✓ Sources thermales : Ce sont des émanations d'eau, de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique à température élevée. Elles doivent leur origine à des émanations de vapeur d'eau provenant de zones profondes qui, lorsqu'elles atteignent les couches superficielles, se refroidissent et se condensent, donnant naissance à des eaux de températures très élevées.

L'exploration géothermique s'intéresse essentiellement à définir et à classer, la source de chaleur, le réservoir géothermique et le fluide géothermique [9].

I.6.2- Types de gisements géothermiques

En matière de gisement géothermique, on distingue quatre types de géothermie :

I.6.2.1- La géothermie à haute énergie

La géothermie haute énergie, exploite les gisements de vapeur sèche ou humide (mélange eau et vapeur), Ces gisements se caractérisent par des températures supérieures à 150°C [13]. On rencontre cette géothermie à haute énergie dans les régions volcaniques et sismiques (frontières de plaques) où le gradient géothermique est particulièrement élevé.

La géothermie haute énergie est destinée principalement à la production d'électricité,

la vapeur, qui est puisée dans le réservoir géothermique, est déchargée dans une turbine, reliée à un alternateur pour la production d'électricité.

La vapeur sèche est directement utilisée alors que la vapeur humide qui est plus fréquente nécessite l'utilisation d'un séparateur.

I.6.2.2- La géothermie à moyenne énergie

La géothermie basse énergie se caractérise par une température comprise entre 30°C et 150° C, elle est rencontrée à une profondeur moyenne de 1000 à 2500 m, dans les formations perméables remplies d'eau situées principalement dans les bassins sédimentaires de grandes dimensions. Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage de serres.

I.6.2.3- La géothermie à basse et très basse énergie

La géothermie très basse énergie est rencontrée à de faibles profondeurs (nappes phréatiques) ou la température est de l'ordre de 10 à 30°C. Elle est utilisée entre autre pour la pisciculture, l'horticulture et le séchage de produits agricoles [14].

I.7- Conclusion

Les énergies renouvelables ont un attrait certain lorsqu'on considère qu'elles peuvent fournir de l'électricité, écologiquement et à bon marché, aux populations isolées, des localités n'ont en effet pas les moyens de se relier à un réseau d'électricité, mais elles peuvent tirer profit des techniques qui ont été mises au point pour domestiquer les sources naturelles d'électricité et de chaleur.

Chapitre 2

Gisement Solaire

II.1- Introduction

L’épuisement des énergies fossiles, le manque de solutions satisfaisantes à la gestion des déchets nucléaires et les risques liés à cette source d’énergie, ainsi que la limitation des émissions des gaz à effet de serre ont suscités un engouement aux énergies renouvelables et en particulier à l’énergie solaire.

II.2- - Rayonnement solaire

Le rayonnement est le transfert d'énergie par ondes électromagnétiques. Le rayonnement se produit directement de la source vers l'extérieur dans toutes les directions. Ces ondes n'ont pas besoin d'un milieu matériel pour se propager, elles peuvent traverser l'espace interplanétaire et atteindre la Terre depuis le Soleil.

La longueur d'onde et la fréquence des ondes électromagnétiques sont importantes pour déterminer leur énergie, leur visibilité et leur pouvoir de pénétration.

II.2.1- Rayonnement solaire diffus

Le rayonnement diffus est aussi appelé rayonnement indirect. Le rayonnement solaire diffus représente la portion du rayonnement solaire qui a touché au moins une particule de gaz atmosphérique en modifiant l'angle d'incidence et qui, cependant, atteint le sol car il est dirigé vers elle. Augmente par rapport au total dans le ciel nuageux. En particulier, la diffusion de Rayleigh de la composante bleue du rayonnement solaire est responsable de la couleur bleue du ciel. Une partie du rayonnement diffus est de retour vers l'espace.

II.2.2 - Rayonnement solaire incident

Le rayonnement solaire incident est ce rayonnement qui a rencontré tout obstacle auquel il a donné tout ou partie de son énergie. L'énergie qui n'atteint pas la surface de la terre est dite éteinte et est formée par un rayonnement réémis, réfléchi et rétrodiffusé dans l'espace. Selon la loi de Lambert, la quantité de rayonnement frappant l'unité de surface est proportionnelle au cosinus de l'angle d'incidence.

La quantité maximale de rayonnement solaire incident est obtenue avec une incidence perpendiculaire, puisque l'angle augmente, à la fois la surface affectée par la même quantité de rayonnement et l'épaisseur de l'atmosphère traversée par ces augmentations. Cela crée les variations quotidiennes, annuelles et latitudinales de l'irradiation.

II.2.3 - Rayonnement solaire réfléchi

Le rayonnement solaire réfléchi est la partie du rayonnement solaire incident réfléchie par la surface de la terre en raison de l'effet albédo. L'albédo est le coefficient de réflexion c. Les valeurs de c sont généralement comprises entre 0 et 1 ou sont exprimées en pourcentage. Il

est donné par la relation entre l'énergie rayonnante réfléchie par une surface par rapport à l'énergie incidente. La Terre a une valeur moyenne de 40% (c = 0,4). À l'altitude de l'albédo terrestre, nous ajoutons les rayonnements réfléchis par les particules atmosphériques dans l'espace.

II.2.4 - Rayonnement solaire absorbé

Après déduction de toutes les pertes dues à la réflexion et rétrodiffusion de l'atmosphère et la surface de la Terre, le rayonnement solaire qui est absorbée par la surface de la Terre et contribue donc à son chauffage, d'une manière variables en fonction de la latitude et du type de surface.

II.3- Rayonnement Solaire à l'Extérieur de l'Atmosphère

Le rayonnement solaire extraterrestre est en fonction de la constante solaire I_0 et de la correction de la distance entre la terre et le soleil. La constante solaire est le flux énergétique reçu par une surface unité. Dans notre cas, la valeur qui a été retenue en1980 est : I_0 = 1367 (W m−2) I_0 est variable autour de l'année puisque la distance terre soleil est elle-même variable (Trajectoire elliptique)[15].

La correction terre soleil est donnée par :

$$I_{SC} = I_0 \times \left[1 + 0.033 \times \cos\left(\frac{360}{365}(N-3)\right)\right] \qquad (1)$$

II.4- Mouvement de la Terre autour du Soleil

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi-circulaire avec une période de 365,25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est le plus près du soleil : 147millions de Km et au solstice d'été qu'elle en est le plus éloigné : 152 millions de Km, la distance moyenne étant de 149,5 millions de Km. La terre coupe le petit axe de son orbite aux équinoxes de printemps (21 Mars) et d'automne (21 septembre). Elle tourne sur elle-même avec une période de 24 heures. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans de l'écliptique.

II.5- Paramètres géographiques

La Terre est séparée par l'équateur en deux demi sphères, l'hémisphère Nord pour celle située du côté du pôle Nord, et l'hémisphère Sud pour celle qui est située du côté du pôle Sud. D'autre part, elle est partagée d'Ouest en Est, par le méridien d'origine qui passe par Greenwich (près de Londres en Angleterre).

- **La latitude**

  La latitude d'un lieu est une valeur angulaire, expression du positionnement nord-sud de l'équateur, d'un point sur la Terre. Théoriquement, elle a pour valeur, 0° à l'équateur jusqu'à 90° aux pôles, elle est comptée positivement de (0 à +90°) vers le Nord et négativement de (0 à -90°) vers le Sud. Généralement, cette grandeur est notée φ.

- **La longitude**

  La longitude d'un lieu est une valeur angulaire, expression du positionnement Est-Ouest d'un point sur Terre par rapport au méridien d'origine. C'est donc une mesure angulaire sur 360° par rapport à un méridien de référence, avec une étendue de +180°à-180°ou180° Està180° Ouest. Généralement, cette grandeur est notée Lon .

- **L'altitude**

  L'altitude exprime un écart entre un point donné et un niveau moyen, le plus souvent le niveau de la mer (ou niveau 0). Les sommets sont associés à une altitude, calculée par divers moyens indirects (géodésie, triangulation).

- **Position du Soleil**

  La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différentes.

- **Coordonnées équatoriales**

  Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles (ω, δ).

II.6- Déclinaison solaire

La déclinaison du soleil δ est l'angle que fait, la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre. La déclinaison varie de -23°27' a u solstice d'hiver à +23°27' au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes **[**16**]** , La déclinaison solaire est bien représentée par la formule suivante**[**18**]** :

$$\delta = 23.45 \times \sin\left[\frac{360}{365} \times (N - 81)\right] \qquad (2)$$

On a aussi l'équation proposé par Copper qui est donnée par :

$$\delta = 23.45 \times \sin\left[\frac{360}{365} \times (N + 284)\right] \qquad (3)$$

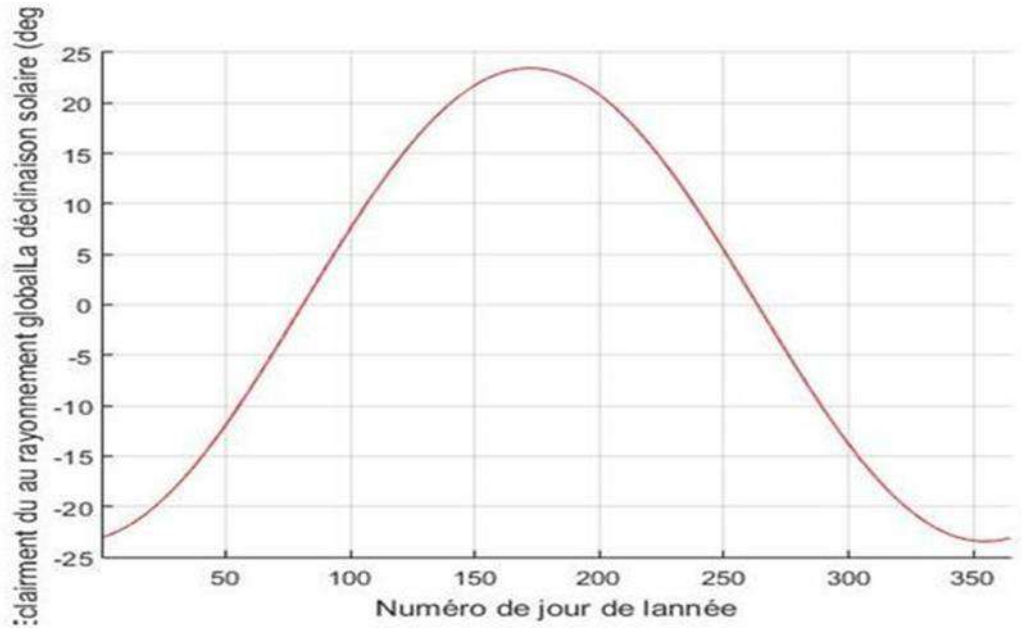


Figure II.1. Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour de l'année selon les deux formules proposées **[**18**].**

II.7- Angle horaire

L'angle horaire ω étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai TSV **[**16**]** . L'angle horaire est donné par l'équation suivante :

$$\omega 1 = 0.261799 \times (TSV - 12) \quad (4)$$

Pour calculer l'angle horaire, Capderou dans l'Atlas Solaire de l'Algérie **[**17**],** a utilisé la formule suivante

$$\omega 2 = 15 \times (TSV - 12) \quad (5)$$

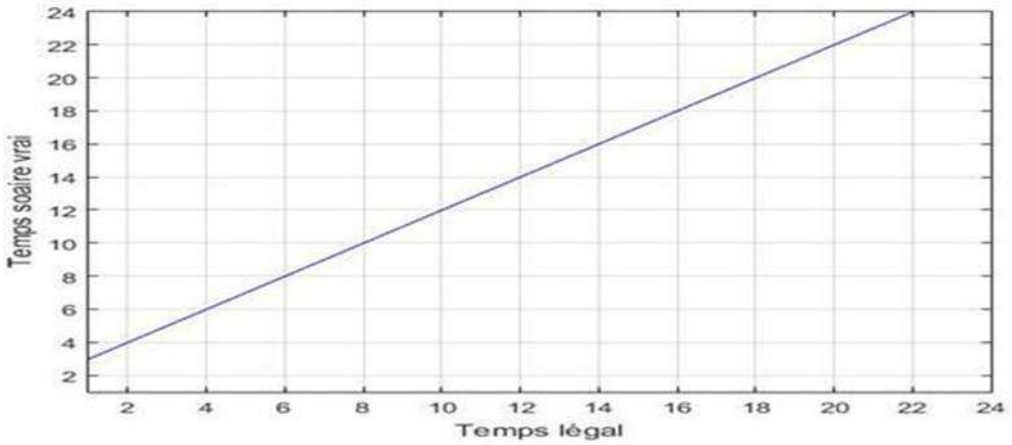


Figure II.2. Variation de l'angle horaire en fonction du temps **[**17**].**

II.8- Temps solaire vrai

Le temps solaire vrai est défini à partir de la rotation de la terre sur elle-même. Il est donc directement lié à l'angle horaire. La terre fait un tour complet en 24H. Il est midi (12H) lorsque le soleil est au zénith, on a donc

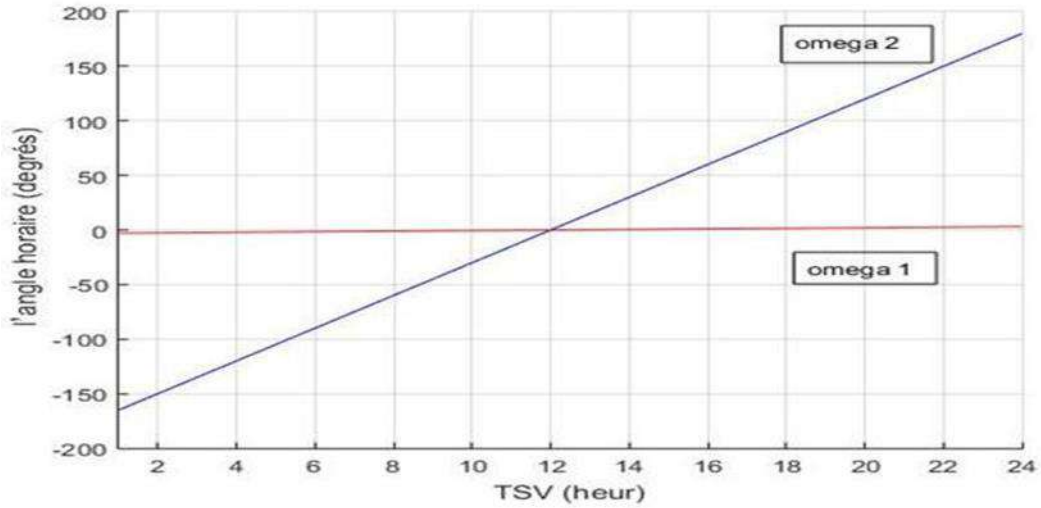


Figure.II.3. La différence entre le temps solaire vrai et le temps légal**[**21**].**

$$TSV = TL - DE\left(\frac{E_t + 4Lon}{60}\right) \qquad (6)$$

TSV : Temps solaire vrai qui est égal au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence.

TL : temps légal (donné par une montre).

DE : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (égale 1 pour l'Algérie).

Et : est la correction de l'équation des temps. Cette correction varie au cours de l'année de −14, 3 (mn) à 16, 4 (mn).

Elle peut être calculée par la formule approchée:

$$E_t = 9.87 \times \sin\left(2N_p\right) - 7.53 \times \cos\left(N_p\right) - 1.5 \times \sin\left(N_p\right) \qquad (7)$$

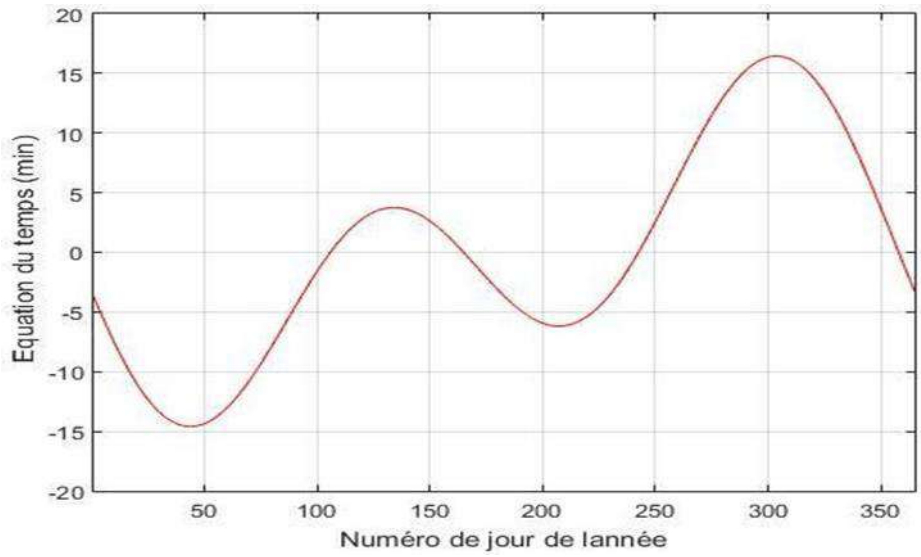


Figure II.4. Evolution de l'équation du temps **[**21**].**

Et : calculée en minutes et en fraction décimale de la minute.

$$N_P = 2\pi \times \frac{N}{356.25} \qquad (8)$$

Lon : Longitude du lieu, en degrés.

II.9- Coordonnées horizontales

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et le vertical du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur h et l'azimut **[**22**]** .

II.10- Hauteur du soleil

La hauteur du soleil (h) est l'angle que fait, le plan horizontal avec la direction du soleil, la valeur (h) = 0 correspond au lever et au coucher du soleil, la hauteur du soleil varie entre +90° (zénith) et -90° (nadir). La hauteur du soleil est bien représentée par une formule bien connue, qui avait été également adoptée par Capderou.

$$h = \sin^{-1}\left[\cos(\delta)\times\cos(\varphi)\times\cos(\omega)+\sin(\varphi)\times\sin(\delta)\right] \qquad (9)$$

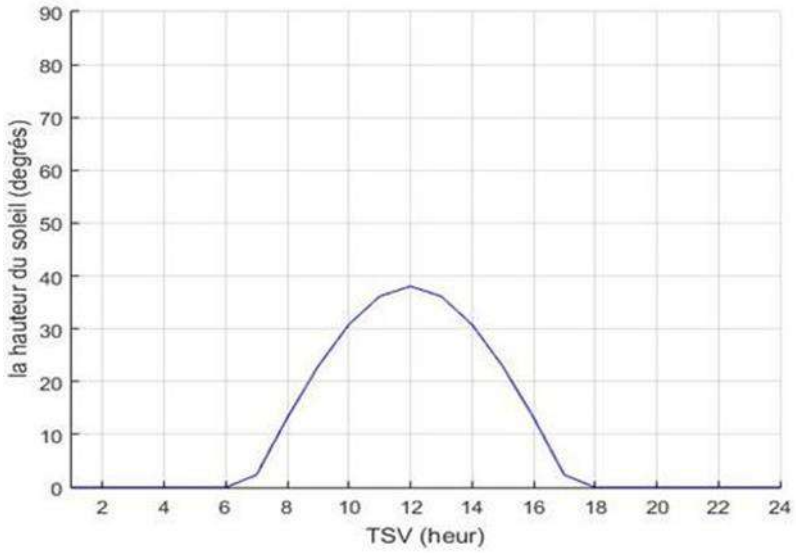


Figure II.5. Variation de la hauteur du soleil au cours d'une journée **[**21**].**

L'angle zénithal $\theta_z = 90^\circ - h$ (10)

II.11- Les modèles semi empiriques

Les modèles semi empiriques utilisent des relations mathématiques en fonction de la masse d'air pour calculer les effets des constituants de l'atmosphère (intégrés sur tout le spectre) sur l'atténuation du rayonnement direct et la création du rayonnement diffus. Plusieurs modèles ont été proposés dans la littérature, parmi lesquels, le modèle de Bird&Hulstrom**[**26**],[**27**]** .

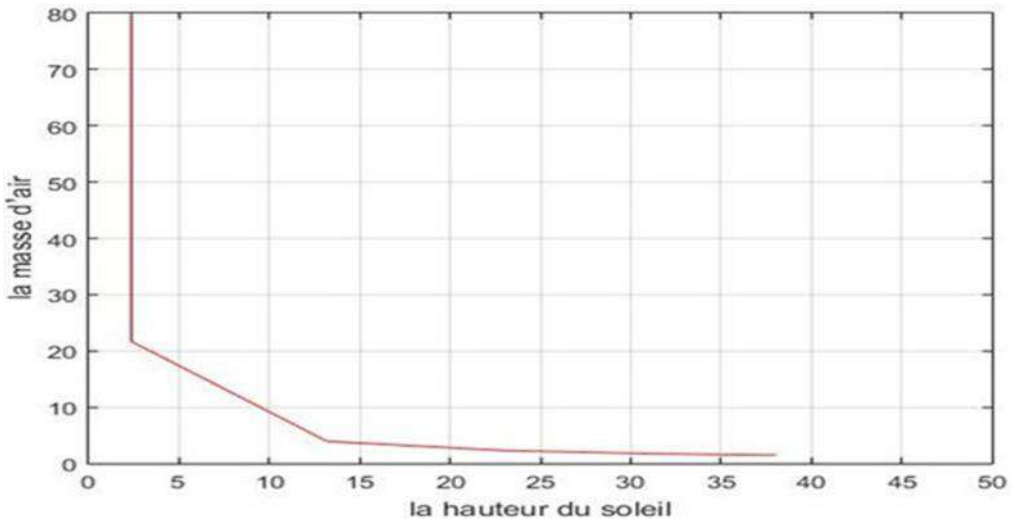


Figure II.6. Composantes du rayonnement solaire calculé par le modèle de Bird & Hulstrom– Site : Médéa [26]

Valeur du facteur Fc en fonction de la distance zénithale

Tableau.II.1-Valeur du facteur Fc en fonction de la distance zénithale

θ_z (°)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	85
F_C	0.92	0.92	0.90	0.90	0.90	0.85	0.78	0.68	0.60	0.50

II.12- Modèle de Bird et Hulstrom

En 1981, Bird et Hulstrom **[**16**]** ont développé un modèle mathématique qui permet de calculer le rayonnement solaire incident sur le sol. Ce modèle tient compte des effets de diffusion et d'absorption que subit le rayonnement solaire lors de sa traversée de l'atmosphère. Il est basé sur la détermination des coefficients de transmission des différents constituants atmosphériques. Ces coefficients nécessitent la disponibilité des paramètres météorologiques courants (l'humidité relative, la température ambiante, la pression atmosphérique,…) et des paramètres géographiques (latitude, longitude et altitude).

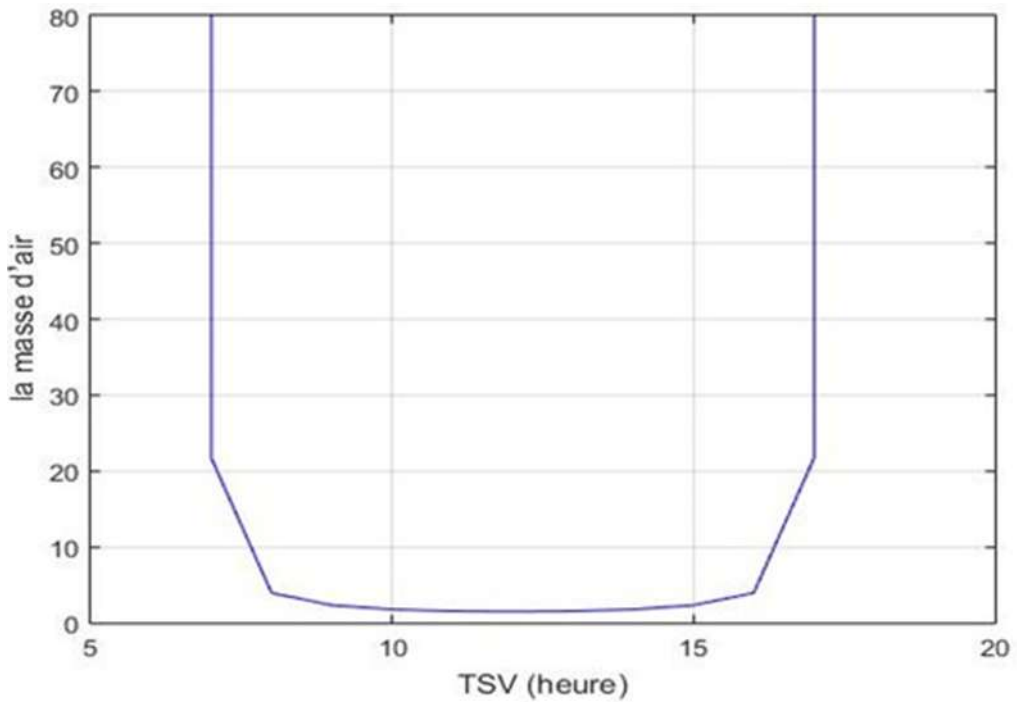


Figure II.7. Variation de la masse atmosphérique au cours d'une journée **[**16**].**

II.13- Calcul du rayonnement direct

L'éclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal est donné par la relation[19] :

$$I = 0.9751 \times I_{sc} \times \tau_r \times \tau_g \times \tau_0 \times \tau_W \times \tau_a \times \cos(\theta_z) \quad (11)$$

Où, le coefficient d'absorption par la couche d'ozone τ_0 est donné par :

$$\tau_0 = 1 - 0.1611 \times U_0 \times (1.0 + 139.48 \times U_0)^{-0.3035} \times 0.002715 \times U_0 \times (1 + 0.044 \times U_0 + 0.0003 \times U_0^2)^{-1}$$

(12)

Où l'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire à travers cette couche et définie par :

$$U_0 = L \times m_r \quad (13)$$

Où m_r est la masse d'air optique relative

$$m_r = \left[\cos\theta_Z + 0.15(93.885 - \theta_Z)^{-1.253}\right]^{-1} \quad (14)$$

Et, représente la quantité d'ozone à la verticale du lieu (épaisseur de la couche d'ozone réduite (cm) NTP)

$$L = \left\{235 + \left[150 + 40\sin\left(0.9856(N-30)\right) + 20\sin(3lon)\right]\left[\sin^2(1.28\varphi)\right]\right\}/1000 \quad (15)$$

Le coefficient de transmission après absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau est donné par :

$$\tau_\omega = 1 - 2.4959 \times U_W \times \left[(1 + 79.03 \times U_W)^{0.6828} + 6.385 \times U_W\right]^{-1} \quad (16)$$

U W Est l'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu(cm).

$$U_W = \frac{0.493}{T} HR \times \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right) \quad (17)$$

Avec la masse d'air corrigée exprimée par :

$$m_a = m_r \left(\frac{P}{1013}\right)^{0.75} \times \left(\frac{273}{T}\right)^{0.5} \quad (18)$$

P est la pression atmosphérique (mbar). Elle peut être calculée à partir de

$$P = P_0 \exp(-0.0001184 \times Z) \quad (19)$$

P0est la pression atmosphérique au niveau de la mer (P0= 1013 mb) ; z , l'altitude du site

(m), par rapport au niveau de la mer; Ta , la température ambiante (K) et HR ,l'humidité relative (%).

Le coefficient de transmission après absorption par les gaz permanents (CO2 et O2) s'exprime en fonction de la masse d'air corrigée à l'aide de l'équation:

$$\tau_g = \exp\left(-0.0127 \times m_a^{0.26}\right) \quad (20)$$

Où, est la masse d'air corrigée exprimée par l'équation.

Le coefficient de transmission après la diffusion moléculaire s'exprime aussi en fonction de la masse d'air par :

$$\tau_r = \exp\left[-0.0903 \times m_a^{0.84}\left(1.0 + m_a - m_a^{1.01}\right)\right] \quad (21)$$

Et le coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols peut se calculer par :

$$\tau_a = \exp\left[-K_a^{0.873} \times m_a^{0.9108} \times \left(1.0 + K_a - K_a^{0.7088}\right)\right] \quad (22)$$

Où

$$K_a = 0.2758 \times K_{a\lambda/\lambda=0.38\mu m} + 0.35 \times K_{a\lambda/\lambda=0.5\mu m} \quad (23)$$

$K_{a\lambda/\lambda=0.38\mu m}$ Et $K_{a\lambda/\lambda=0.5\mu m}$ Sont deux coefficients d'atténuation déterminés à partir des mesures expérimentales déduites par l'équation

$$K_a(\lambda) = \beta \times \lambda^{-\infty} \quad (24)$$

Où, α est le coefficient de distribution granulométrique et β le coefficient de trouble atmosphérique établi par Angstrom et déterminés dans la section (2.2.1). Ces valeurs nous ont permis de calculer $K_{a\lambda/\lambda=0.5\mu m}$ et $K_{a\lambda/\lambda=0.5\mu m}$

II.14- Calcul du rayonnement diffus

le rayonnement diffus sur un plan horizontal est la somme des trois composantes diffuses dues aux divers types de diffusion du rayonnement solaire par la pellicule atmosphérique.

$$D = D_r + D_a + D_m \quad (25)$$

Le rayonnement diffus issu de la diffusion de Rayleigh est donné par :

$$D_r = 0.79 \times I_{sc} \times \cos(\theta_z) \times \tau_0 \times \tau_g \times \tau_W \times \tau_{aa} \times 0.5 \times \frac{(1-\tau_r)}{\left(1 - m_a + m_a^{1.02}\right)} \quad (26)$$

Où, est donnée par l'expression suivante :

$$\tau_{aa} = 1 - (1-\omega_0) \times \left(1 - m_a + m_a^{1.06}\right) \times (1-\tau_a) \quad (27)$$

Et ω_0 , est le coefficient de réflexion unitaire relatif à la diffusion par les aérosols. Dans Ce modèle, Bird & Hulstrom recommandèrent ω_0 =0,90.

Le rayonnement diffus après la diffusion par les aérosols est donnée par :

$$D_a = 0.79 \times I_{sc} \times \cos(\theta_z) \times \tau_0 \times \tau_W \times \tau_{aa} \times F_c \times \frac{(1-\tau_{as})}{(1-m_a+m_a^{1.02})} \quad (28)$$

Où F_C , est le coefficient de dispersion de l'atmosphère. F_C= 0.84est la valeur commandée par ce modèle.

τ_{as} Est donné par la relation suivante : $\tau_{as} = \tau_a / \tau_{aa}$ (29)

Le diffus dû au phénomène de multi réflexion terre atmosphère est donné par :

$$D_m = \frac{(I + D_a + D_r) \times \rho \times \rho_a'}{(1-\rho_g \times \rho_a')} \quad (30)$$

ρ Est l'albédo du sol, dont les valeurs sont données dans le tableau suivant

Tableau II.1 : Quelques valeurs d'albédo **[**24**]**

Type de surface	**Albédo (0 à1)**
Surface de lac	0,02 à0,04
Forêt de conifers	0,05 à0,15
Surface de lamer	0,05 à0,15
Sol somber	0,05 à0,15
Cultures	0,15 à0,25
Sable Léger et sec	0,25 à0,45
Glace	environ0,60
Neige tassée	0,40 à0,70
Neige fraiche	0,75 à0,90
Miroir	1

Avec, ρ est l'albédo terrestre, et, ρ_a' est l'albédo du ciel clair donné par :

$$\rho_a' = 0.0685 + (1-F_c) \times (1-\tau_{as}) \quad (31)$$

II.15- Calcul du rayonnement global

Le rayonnement global sur un plan horizontal est la somme des deux composantes solaires directe et diffuse soit :

$$G=I+D \quad (32)$$

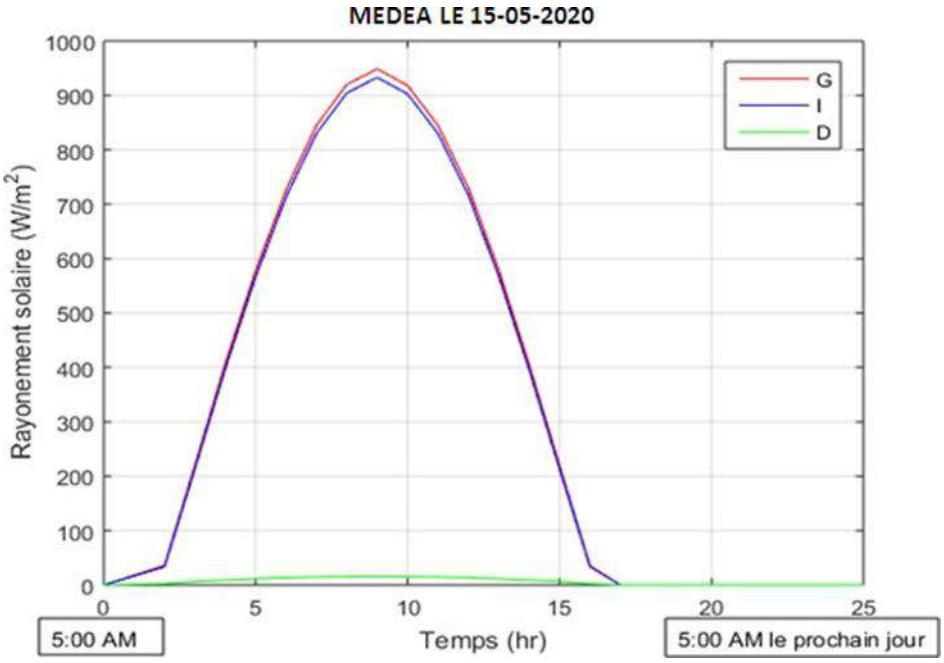


Figure II.8. Variation de rayonnement solaire au cours du temps[24]

Tableau.II.2.Coordonnées géographique de site utilisé

Site	Date	Latitude	Longitude	Altitude
Médéa	**15/05/2020**	**36.28°**	**2.73°**	**981 m**

II.16- Applications à basses et hautes températures

II.16.1- Applications à basses températures

- **Le chauffage**

Le système solaire permet d'utiliser la chaleur produite pour les besoins d'eau chaude sanitaire, le chauffage d'habitats

- **Le dessalement des eaux**

Le dessalement de l'eau de mer est désormais un principe envisageable, voire nécessaire pour obtenir de l'eau potable. Le solaire thermique paraît être le mieux adapter à le réaliser

- **Le séchage solaire des fruits**

Les fruits peuvent être séchés grâce à l'énergie solaire. Ils sont disposés dans une enceinte à l'intérieur de laquelle un courant d'air circule au-dessus des fruits.

II.16.2- Applications à hautes températures

- **L'électricité**

Le système de turbine à vapeur pour la production d'électricité présente un danger environnemental, puisqu'il dégage du CO2 et contribue ainsi au réchauffement climatique. Nous pouvons alors envisager de remplacer la chaudière à gaz qui entraine la turbine par des collecteurs solaires, cylindro-paraboliques, qui engendrent des fluides caloporteurs à haute température et par suite produisent de la vapeur d'eau Il faut également encourager l'utilisation des panneaux solaires photovoltaïques pour la production d'énergie électrique [28].

Chapitre 3

Etude Théorique

III.1-BASSIN D'EAU SOLAIRE

III.1.1- Introduction

Un bassin solaire est constitué par une masse d'eau peu profonde, chauffé par le soleil. L'eau absorbe le rayonnement infrarouge, mais est relativement transparente aux rayons visibles et ultraviolets qui pénètrent dans la masse d'eau.

III.1.2-PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'énergie solaire incidente atteint le fond rendu, au préalable noir. Elle est alors absorbée de sorte que les couches d'eau intérieures sont chauffées par le rayonnement émis par le fond du bassin solaire.

A cause de l'évaporation du rayonnement, de la conduction et surtout de la convection, on n'observe qu'un faible écart vertical de température. Ainsi la propagation de la chaleur à travers la masse d'eau est limitée car les transferts thermiques qui s'effectuent que par conduction et rayonnement et il en résulte un gradient de température assez élevé.

Il y a donc captage d'énergie solaire sur une surface qui peut être importante et stockage de chaleur dans la couche du fond car le transfert conductif vertical est très faible.

Contrairement aux capteurs classiques qui peuvent être orientés de façon à être autant que possible perpendiculaire au rayonnement direct, le bassin solaire est toujours horizontal et pourtant la quantité d'énergie captée varie considérablement selon les saisons. C'est en été que l'apport calorifique est le plus important puisque l'ensoleillement est supérieur, l'angle d'incidence plus favorable, les pertes par réflexion moins importantes, alors que c'est en hiver que l'on a besoin des calories. Malgré ces contraintes, il faut s'assurer de l'aptitude du Bassin solaire à jouer le rôle de stockage. Il est à noter, cependant, que si les bassins solaires ne constituent pas de parfaits stockage saisonniers, ils permettent le stockage long duré.

Le fonctionnement des bassins solaires dépend d'un certain nombre de facteurs dont le plus important leur stabilité

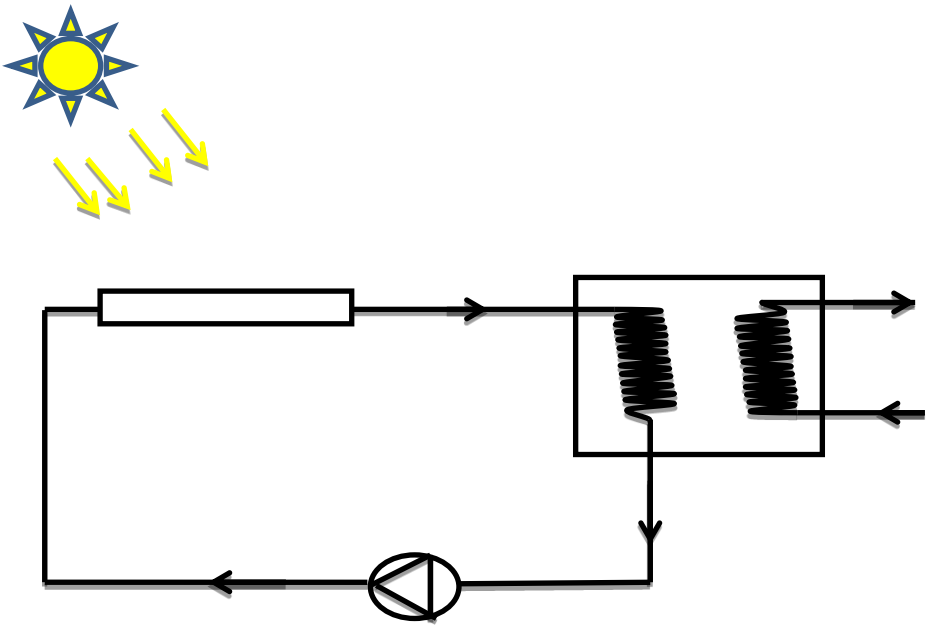


figure.III.1-Shéma de fonctionnement d' bassin solaire

III.1.2.1-DIFFERENT TYPES DE BASSIN SOLAIRE :

A partir de l'idée que l'on peut capter l'énergie solaire ,on peut imaginer de très nombreuse variantes du bassin solaire classique .

III.1.2.1.1-BASSIN TRES PEU PROFONDS :

Ce type est étudié par V.V.N.KISHORE et al.[29,30], Ces bassins sans sel , de 10à 20 cm de profondeur, de grande surface recouverts d'un double ou triple film plastique. On fait circuler l'eau dans ce bassin puis, on la recueille dans un réservoir, d'où elle est pompée vers une utilisation ou de nouveau vers le bassin. (Figure . III.2)

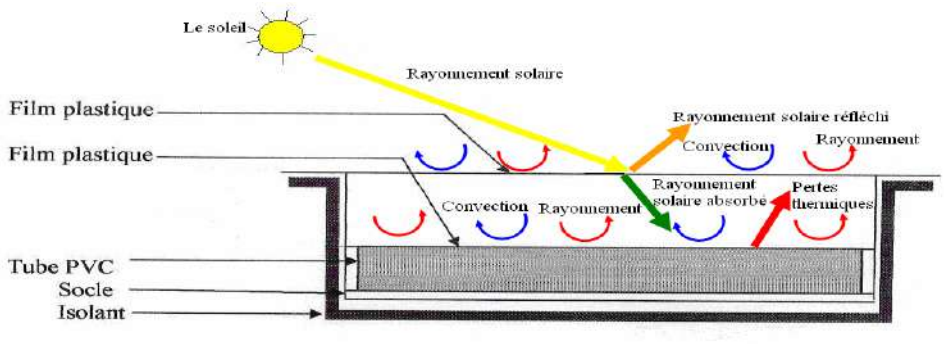


Figure.III.2-Bassin d'eau solaire peu profond

Le Lawrence LivermoreLaboratory (Université de Californie) à étudié un système de production de l'électricité par voie thermodynamique où l'énergie est apportée par un bassin de ce type. (Figure.III.3).

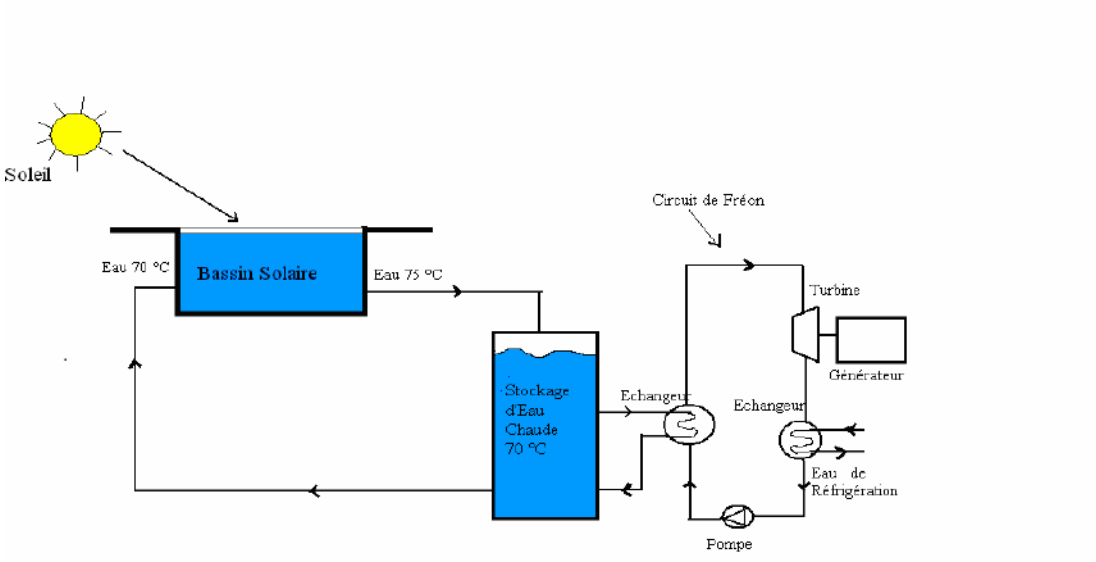


Figure.III.3-Bassin d'eau solaire peu profonde la production d'électricité

III.1.2.1.2-BASSIN AVEC UNE ZONE DE CONVECTION :

Ce type est étudié par RABL et al.[31,30,32,33,34], est constitué de deux zones superposées :

* Une zone isolante, semblable au bassin solaire classique (épaisseur d'environ 1m, gradient de concentration de sel…)

Une zone de convection jouant le rôle de stockage des calories (épaisseur

* d'environ 1.5 m, température uniforme, eau destinée au chauffage)
* Les deux zones sont séparées par un film plastique transparent .Pour éviter les pertes par évaporation, RABL et NIELSEN proposent de couvrir le bassin d'un autre film plastique recouvert d'une fine pelliculaire d'eau qui minimisera la réflexion. (Figure.III.4)

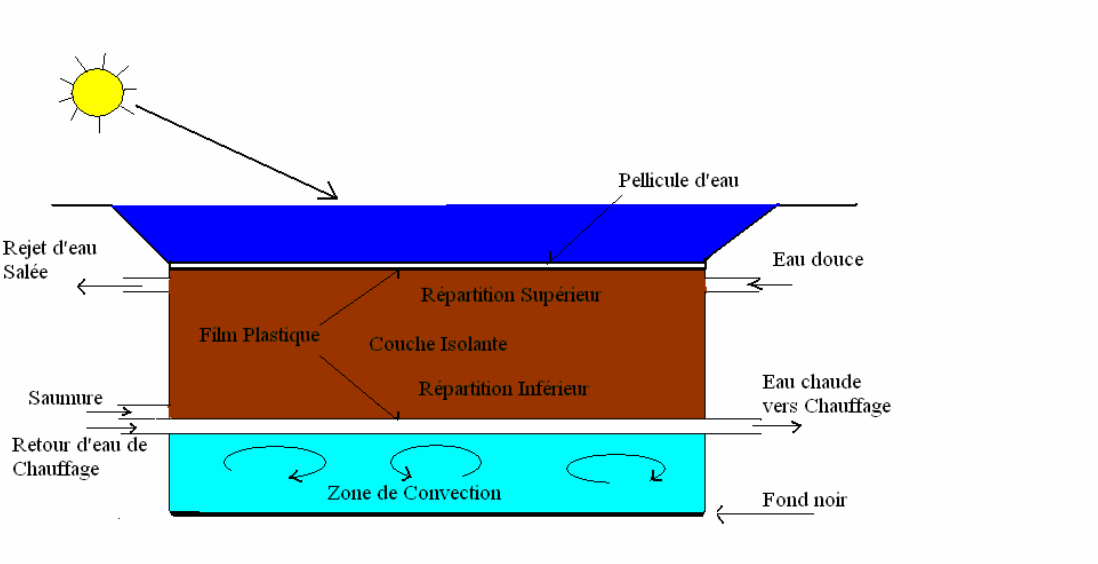


Figure.III.4-Bassin d'eau solaire avec zone de convection

III.1.2.1.3-BASSIN DESTINE A LA PRODUCTION DE SEL :

Une des applications les plus intéressantes des bassins solaires est la production simultanée de sel et d'énergie, ce qui abaisse le prix de revient. De plus, cette solution élimine les problèmes de rejets d'eau salée. (FigureIII.5)

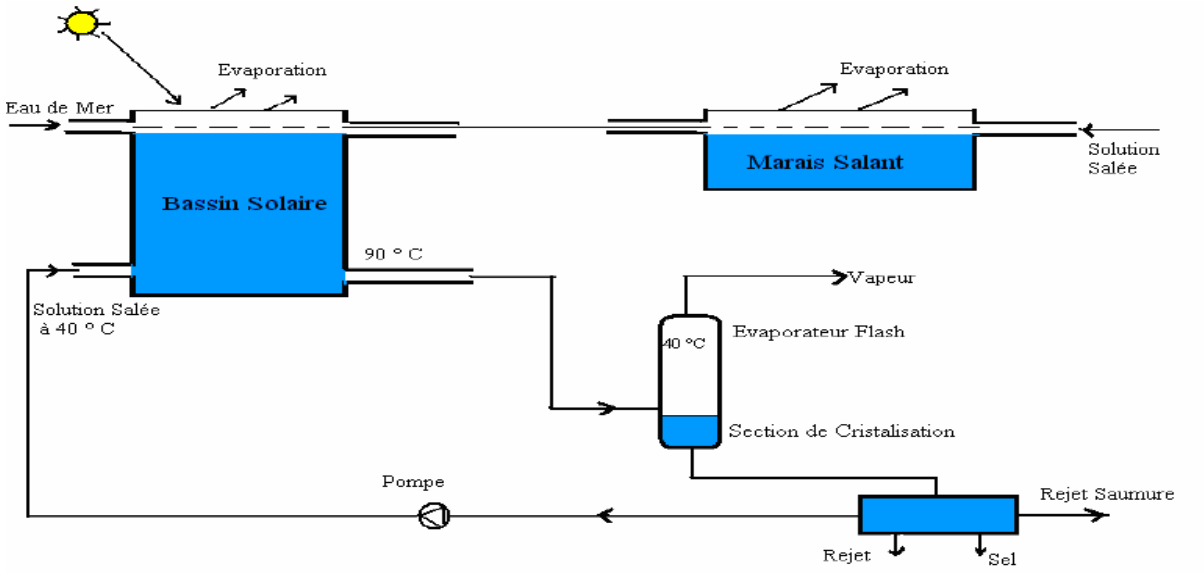


Figure.III.5-Bassin d'eau solaire destine à la production de sel

III.1.2.1.4-BASSIN MUNIS DE STRUCTURES ANTIPERTES :

Le procédé repose sur le fait qu'avec des structures anti pertes, on pourrait avoir des températures élevées à la surface du bassin et donc se passer du gradient de concentration en sel .le gradient de température est inversé à la conception classique. (Figure III.6).

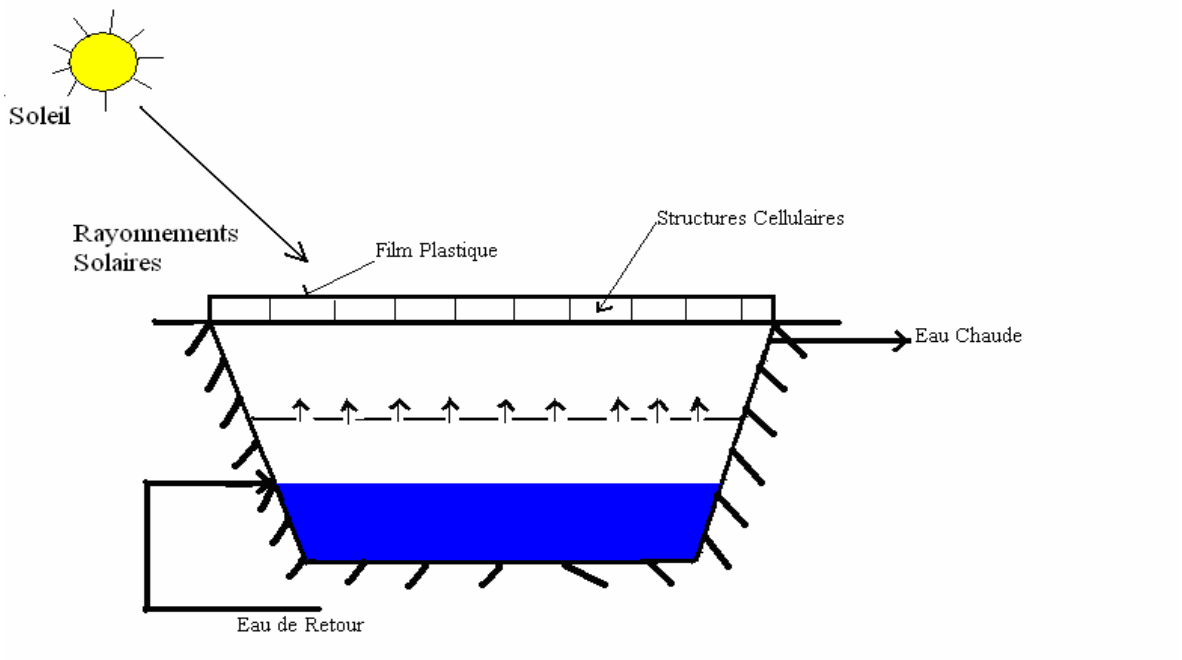


Figure .III.6-Bassin d'eau solaire muni de structures anti pertes

III.1.2.1.5-ETANGS TOMBANTS :

Ce type est étudié par TABOR [30], tel que la chaleur est soutirée par décantation de la couche du fond et conduite à un évaporateur. En outre, la solution est concentrée dans l'évaporateur et renvoyée au fond du bassin pour y être réchauffée, tandis que de l'eau fraîche (eau de mer) est ajoutée à la surface. Comme il y a addition d'eau à la surface et soutirage au fond, le mouvement convectif descendant de l'eau s'oppose au mouvement du sel vers la surface. Avec une régulation convenable des débits d'eau, la concentration en sel reste stationnaire dans le bassin qui peut fonctionner sans consommer du sel après le remplissage initial. Comme la vitesse de chute nécessaire pour équilibrer la

Diffusion est plus petite que celle nécessaire pour soutirer toute la chaleur captée avec l'évaporateur, il faut compenser la baisse de concentration de la couche, d'eau salée provenant de l'évaporateur. (Figure .III.7)

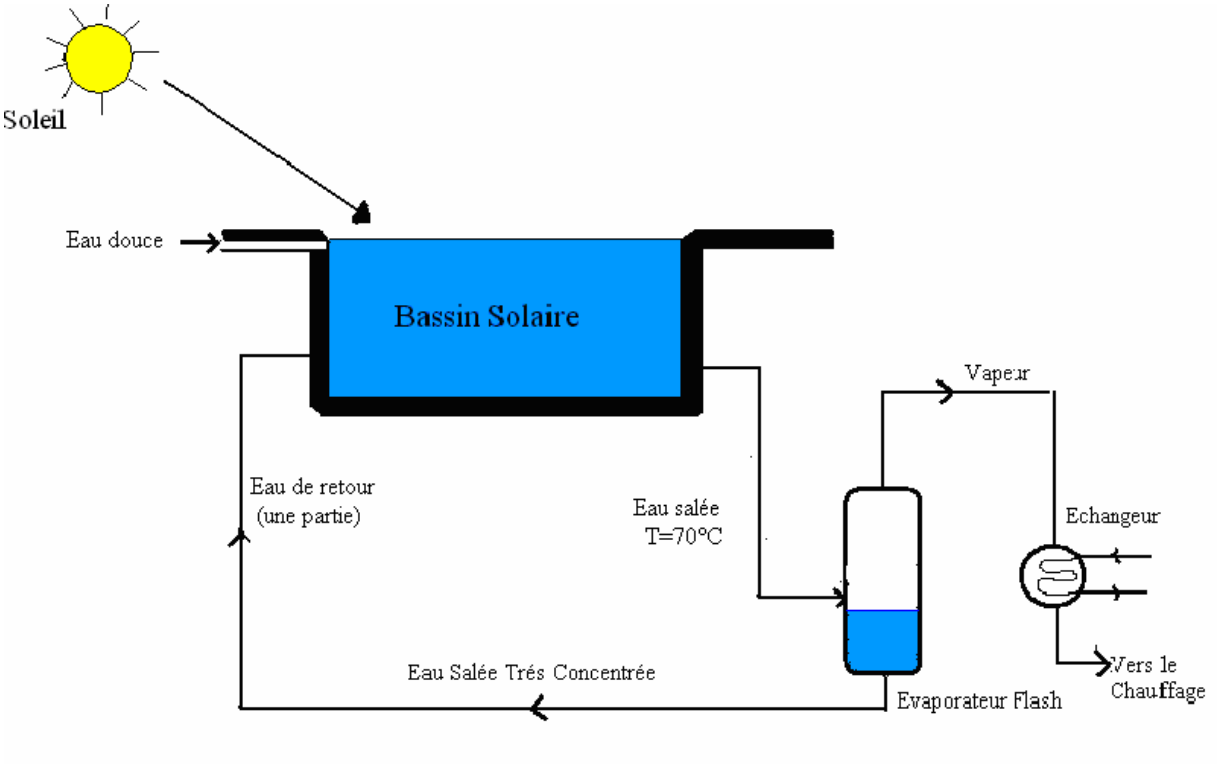


Figure.III.7.Etangs Toumants

III.1.3-Equations de bilan thermique :

III.1.3.1-Équations du bilan énergétique pour le couvercle de verre supérieur :

$$I_T \alpha_c A_c + h_{c,c_1\to c_2} A_c \left(T_{C_1} - T_{C_2}\right) + h_{r,c_1\to c_2} A_c \left(T_{c_1} - T_{c_2}\right)$$
$$= h_{c,c_2\to a} A_c \left(T_{c_2} - T_a\right) + h_{r,c_2\to s} A_c \left(T_{c_2} - T_a\right) + h_{r,c_2\to s} A_c \left(T_{c_2} - T_s\right) \quad (1)$$

Où :

I_T IL s'agit du rayonnement solaire (W/ m^2).

α_c Est l'absorptivité du couvercle en verre.

A_c Est la zone de la couverture en verre m^2 .

$h_{c,c_1\to c_2}$ Est le coefficient de transfert de chaleur convectif entre les couvercles inférieurs et supérieurs par verre (W/ m^2 K), il peut être calculé à l'aide de la corrélation suivante :

$$h_{c,c_{1\to c_2}} = \frac{\overline{Nu_{x_g}} \times K_a}{X_g} \quad (2)$$

Où :

K_a Est la conductivité thermique de l'air (W/m K).

X_g Est l'écart entre les couvercles en verre (m).

$\overline{Nu}$ Est le nombre moyen de Nusselt, il peut être calculé comme suit :

$$\overline{Nu_{X_g}} = 1 + 1.44\left[1 - \frac{1708}{5830}\right]^* + \left[\left(\frac{Ra_{X_g}}{5380}\right)^{1/3} - 1\right]^* \qquad (2)$$

Pour $1700 \leq Ra \leq 108$.

où la notation $[]^*$ indique que si la quantité à l'intérieur de la parenthèse est négative, la quantité doit être prise comme zéro.

Ra est le numéro de Rayleigh

$Ra = Gr\ \mathrm{Pr}$

Gr est le numéro du Grashof :

$$G_r = \frac{\beta_g L^3 \Delta T}{v^2}$$

β Est le coefficient de température (1/K).

g Est l'accélération due à la gravité m/s^2 .

Pr Est le nombre de Prandtl :

$$\mathrm{Pr} = \frac{C_p u}{K} or \frac{v}{\alpha}$$

Où :

C_P Est la chaleur spécifique (J / Kg K).

μ Est la viscosité absolue (N_s / m^2).

K Est la conductivité thermique (W/mK).

v Est la viscosité cinématique (m^2 /s).

α Est la diffusivité thermique (m^2 /s), elle peut être calculée comme suit :

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_P} \qquad (3)$$

Avec :

ρ est la masse volumique (Kg/ m^3)

$h_{R,c_{1\to}c_2}$ est le coefficient de transfert de chaleur radiatif entre les couvercles inférieurs et supérieurs de verre (W/ m^2 K), il peut être calculé en utilisant la corrélation suivante :

$$h_{c,c_{1\to}c_2}=\frac{\sigma\left(T_{c_1}^2+T_{c_2}^2\right)\left(T_{c_1}+T_{c_2}\right)}{\frac{2}{{}^{\varepsilon}C}-1} \quad (4)$$

σ est la constante de Stefan Boltzmann (W/ m^2 K^4).

${}^{\varepsilon}C$ est l'émissivité de la couverture en verre.

$h_{c,c_2\to a}$ est le coefficient de transfert de chaleur convectif du couvercle en verre supérieur à l'air ambiant (W/ m^2 K), il peut être calculé à l'aide de la corrélation suivante :

$$h_{c,c_2\to a}=5.7+3.8\times V$$

V est la vitesse du vent (m).

$h_{R,c_2\to s}$ Est le coefficient de transfert radiatif de la couche supérieure de verre à l'air ambiant (W/ m^2 K), il peut être calculé à l'aide de la corrélation suivante :

$$h_{R,c_2\to s}=\varepsilon_C\sigma\left(T_{C_2}^2+T_s^2\right)\left(T_{c_2}+T_s\right) \quad (5)$$

T_s Est la température du ciel (K) et elle est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$T_s=0.0052T_a^{1.5} \quad (6)$$

Où T est la température de l'air ambiant (K).

III.1.3.2-Équations du bilan énergétique pour le capot inférieur en verre

$$\mathrm{I_T\tau_c\alpha_cA_c+h_{c,\omega\to c_1}A_\omega\left(T_\omega-T_{c_1}\right)=h_{c,c_1\to c_2}A_c\left(T_{c_1}-T_{c_2}\right)}$$
$$\mathrm{+h_{r,c_1\to c_2}A_c\left(T_{c_1}-T_{c_2}\right)} \quad (7)$$

Où τ_c est transmissivité du couvercle de verre.

$h_{C,\omega\to c_1}$ Est le coefficient de transfert de chaleur convectif de l'eau du bassin vers les couvercles de verre inférieurs (W/ m^2 K), il peut être calculé comme suit :

$$h_{C,\omega\to c_1}=\frac{\overline{Nu_{X_W}}\times K_W}{X_W} \quad (8)$$

Où $\overline{Nu_{X_W}}$ est le nombre moyen de Nusselt, il peut être calculé comme suit :

$$\overline{Nu_{X_W}} = 1 + 1.44\left[1 - \frac{1780}{Ra_{X_W}}\right]^{*} + \left[\left(\frac{Ra_{X_W}}{5830}\right)^{1/3} - 1\right]^{*} + 2\left[\frac{Ra_{X_W}^{1/3}}{140}\right]^{\left[1-\ln\left(\frac{Ra_{X_W}^{1/3}}{140}\right)\right]} \quad (9)$$

X_W est la profondeur de l'eau du bassin (m).

Température du couvercle supérieur en verre

$$T_{C2} = \frac{h_{c,\omega\to c_1} A_\omega T_\omega + A_c\left[I_T \tau_c \alpha_c + T_{c_2}\left(h_{c,c_1\to c_2} + h_{r,c_1\to c_2}\right)\right]}{h_{c,\omega\to c_1} A_\omega + A_c\left(h_{c,c_1\to c_2} + h_{r,c_1\to c_2}\right)} \quad (10)$$

Température du couvercle inférieur en verre :

$$T_{C_1} = \frac{h_{c,\omega\to c_1} A_\omega T_\omega + A_c\left[I_T \tau_c \alpha_c + T_{c_2}\left(h_{c,c_1\to c_2} + h_{r,c_1\to c_2}\right)\right]}{h_{c,\omega\to c_1} A_\omega + A_c\left(h_{c,c_1\to c_2} + h_{r,c_1\to c_2}\right)} \quad (11)$$

III.1.3.3-Équation du bilan énergétique pour la plaque absorbante

$$I_T \tau_c^2 \tau_\omega^{'} \alpha_\rho \left(A_\rho - \frac{A_{he}}{2}\right) = h_{c,\rho\to\omega}\left(A - \frac{A_{he}}{2}\right)\left(T_\rho - T_\omega\right) + U_b A_\rho \left(T_P - T_a\right) + Q_u \quad (12)$$

$\tau_\omega^{'}$ Est la transmissivité de l'eau du bassin en présence de la chaleur ex-tube changeur :

$$\tau_\omega^{'} = \sum_{i=1}^{5} \psi_i \exp\left(-\mu_i X_\omega\right) \quad (13)$$

Où μ_i est le coefficient d'extinction (m) 1 de la partie rayonnement solaire ψ_i. Les valeurs de μ_i et ψ_i sont données

A_{he} Zone du tube de l'échangeur de chaleur (m^2) où :

$$A_{he} = 2\pi r L_{he} \quad (14)$$

Tableau.III.1.Coefficients de transmission de l'eau

i	ψ	μm^{-1} .
1	0.237	0.032
2	0.137	0.45
3	0.167	3
4	0.179	35

L_{he} Est la longueur du tube de l'échangeur de chaleur (m^2).

Q_u Est le taux d'énergie thermique transférée de l'eau du bassin vers le tube échangeur de chaleur du bassin (W), est donné par :

$$Qu = m_f C_f (T_{fo} - T_{fi}) \quad (15)$$

m_f : est le débit massique (Kg/s)

III.1.3.4-Équation du bilan énergétique pour l'eau du bassin :

$$\left(\frac{p}{2}\right) I_T \tau_c^2 \tau_\omega' \alpha_{he} dx + h_{c,p\to f}\left(\frac{p}{2}\right)(T_p - T_f)dx + h_{C,w\to f}\left(\frac{p}{2}\right)(T_w - T_f)dx$$
$$= \dot{m}_f C_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial x}\right)dx + A_t \rho_f C_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial x}\right)dx \quad (16)$$

P est le périmètre du tube de l'échangeur de chaleur du bassin (m), est donné par :

$$P = 2\pi r \quad (17)$$

α_{he} Est l'absorptivité du tube de l'échangeur de chaleur.

$h_{C,w\to f}$ Est le coefficient de transfert de chaleur convectif entre l'eau et le fluide de transfert de chaleur, est calculé par la corrélation suivante :

$$\frac{1}{h_{Cw\to f}} = \left(\frac{1}{h_0}\right) + \left(\frac{X_{he}}{K_{he}}\right) + \left(\frac{1}{h_i}\right) \quad (18)$$

X_{he} Est l'épaisseur du tube de l'échangeur de chaleur (m).

X_{he} Est la conductivité thermique du tube de l'échangeur de chaleur (W/mK).

Où :

$$h_0 = h_i = \frac{(NuK_f)}{D_{he}} = 0.47\left(\frac{K_f}{D_{he}}\right)(Gr\,\mathrm{Pr})^{\frac{1}{4}} \quad (19)$$

h_0 Est le coefficient de transfert de chaleur convectif de l'eau du bassin à la surface extérieure du tube d'échange de chaleur

h_i Est le coefficient de transfert de chaleur convectif de la surface interne du tube de l'échangeur de chaleur au fluide de transfert de chaleur

D_{he} Est le diamètre du tube de l'échangeur de chaleur (m).

p_f Est la masse volumique du fluide caloporteur (Kg/m^3)

A_t Est la section transversale du tube de l'échangeur de chaleur (m^2), et est donnée par :

$A_t = \pi r2$

Température de la plaque absorbante :

$$T_p = \frac{\left(A_p - \frac{A_{he}}{2}\right)\left(I_T \tau_c^2 \tau_\omega^{'} \alpha_p + h_{C,p\to\omega} T_\omega\right) + U_B A_p - Q_u}{h_{C,p\to\omega}\left(A_p - \frac{A_{he}}{2}\right) + U_b A_p} \tag{20}$$

$$M\left(\frac{dT_\omega}{dt}\right) + a_1 T_\omega = f_1(t)$$

Température de l'eau du bassin :

$$T_\omega = \frac{f_1(t)}{a_1} + \left(T_{\omega i} - \frac{f_1(t)}{a_1}\right)\exp^{\left(\frac{-at}{M}\right)} \tag{21}$$

Où :

$$a_1 = \left[\frac{h_{C,w\to c_1} A_w A_w A_c \left(h_{C,c_1\to c_2}\right)}{h_{C,w\to c_1} A_w + A_c\left(h_{C,c_1\to c_2} + h_{R,c_1\to c_2}\right)}\right] + \left[\frac{h_{C,p\to w}\left(A_p - \frac{A_{he}}{2}\right) U_b A_p}{h_{C,p\to w}\left(A_p - \frac{A_{he}}{2}\right) + U_b A_p}\right]$$

$$+ h_{C,w\to f}\left(\frac{A_{he}}{2}\right) + U_s A_s \tag{22}$$

$$f_1(t) = \left| \frac{h_{C,p\to w}\left(A_P - \frac{A_{he}}{2}\right)\left\{I_T \tau_c^2 \tau_w^{'} \alpha_p + T_a\left[U_b A_P + U_s A_s + \left(\frac{U_b A_P U_S A_s}{h_{C,p\to w}\left(A_p - \frac{A_{he}}{2}\right)}\right)\right] - \dot{Q}_u\right\}}{h_{C,p\to w}\left(A_p - \frac{A_{he}}{2}\right) + U_b A_p} \right|$$

$$+ I_T \tau_c^2 \alpha_w A_w + h_{C,w\to f}\left(\frac{A_{he}}{2}\right) T_f + \left| \frac{h_{C,w\to c_1} A_w \left\{A_c\left[I_T \tau_c \alpha_c + T_{c_2}\left(h_{C,c_1\to c_2} + h_{R,c_1\to c_2}\right)\right]\right\}}{h_{C,w\to c_1} A_w + A_c\left(h_{C,c_1\to c_2} + h_{R,c_1\to c_2}\right)} \right| \tag{23}$$

En remplaçant Tp et en utilisant l'équation 3.38, l'équation 3.33 peut être écrite comme suit :

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} + a_2 \frac{\partial T_f}{\partial t} + b_1 T_f = f_2(t) \tag{24}$$

Où :

$$f_2(t) = \frac{\left(\frac{p}{2}\right)\left(I_T \tau_c^2 \tau_w' \alpha_{he} + h_{C,p\to f} T_p + h_{C,w\to f} T_w'\right)}{\dot{m}_f C_f} \tag{25}$$

Et :

$$b_1 = \frac{\left(\frac{p}{2}\right)\left(h_{C,p\to f} + h_{C,w\to f}\right)}{\dot{m}_f C_f} \tag{26}$$

Et :

$$a_2 = \left(\frac{A_t p_f}{\dot{m}_f}\right) \tag{27}$$

Pour résoudre l'équation aux dérivées partielles 3.43, la relation de transfor- mation suivante est utilisée :

$$\varepsilon = x + \frac{t}{a_2} \tag{28}$$

En utilisant l'équation 3.47, l'équation 3.43 devient :

$$2\left(\frac{dT_f}{\varepsilon}\right) + b_1 T_f = f_2(t) \tag{29}$$

En utilisant la condition initiale T_f (x = 0, t = 0)= T_{fi}, la solution de l'équation 3.48 peut s'écrire comme suit

$$T_f(x,t) = T_{fi} \exp\left(-\left(\frac{b_1}{2}\right)\left(x + \frac{t}{a_2}\right)\right) + \left(\frac{f_2(t)}{b_1}\right)\left(1 - \exp\left(-\left(\frac{b_1}{2}\right)\left(x + \frac{t}{a_2}\right)\right)\right) \tag{30}$$

La température du fluide de l'échangeur de chaleur est obtenue comme suit :

$$T_{f_0} = T_f\left(x,t\right)_{x=L_{he}} = T_{fi}\exp\left[-\left(\frac{b_1}{2}\right)\left(L_{he}+\frac{t}{a_2}\right)\right]$$
$$+\left(\frac{f_2(t)}{b_1}\right)\left\{1-\exp\left[-\left(\frac{b_1}{2}\right)\left(L_{he}+\frac{t}{a_2}\right)\right]\right\} \quad (31)$$

Le taux d'énergie collectée :

$$Q_{coll} = \frac{m_w C_w\left(T_{fo}-T_{fi}\right)}{\Delta t} \quad (32)$$

L'équation HWB pour le flux de chaleur instantané (horaire) par unité de surface du SSP est définie comme suit :

$$\dot{q} = \left(\alpha\tau\right)_e I_T - U_l\left(T_{wf}-T_{wi}\right) \quad (33)$$

Où I_T est le flux solaire total incident sur la couverture du bassin, T_{wi} est la température initiale de l'eau du bassin et T_{wf} est la température finale de l'eau du bassin et U_l est le coefficient de perte global sont calculés comme suit :

$$U_l = U_b + U_s\left(\frac{A_s}{A_b}\right) + U_t \quad (34)$$

U_t est le coefficient de perte supérieur du SSP, il peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$U_t = \frac{1}{\left(h_{C,p\to w}\right)^{-1} + \left(h_{C,w\to c_1}\right)^{-1} + 2\left(\frac{K_g}{X_g}\right)^{-1}\left(h_{C,c_1\to c_2}+h_{R,c_1\to c_2}\right)^{-1} + \left(h_{C,c_2\to a}+h_{R,c_2\to s}\right)^{-1}} \quad (34)$$

où :

X_g Est l'épaisseur du couvercle en verre (m)

K_g Est la conductivité thermique du couvercle en verre (W/mK)

L'efficacité de collecte instantanée η_i est définie comme

$$\eta_i = \frac{\dot{q}}{I_T} \quad (35)$$

Il est également utile de définir l'efficacité de la collecte quotidienne η_d

$$\eta_d = \frac{\int q dt}{\int I_T dt} \tag{36}$$

L'efficacité instantanée de l'élimination de la chaleur η_{ir} est définie comme

$$\eta_{ir} = \frac{Q_u}{I_T} \tag{37}$$

L'efficacité quotidienne de l'élimination de la chaleur η_d est définie comme suit :

$$\eta_{dr} = \frac{\int Q_u dt}{\int I_T dt} \tag{38}$$

III.2-RESERVOIR DE STOCKAGE

III.2.1-Stockage thermique de l'énergie

Le stockage de l'énergie thermique concerne principalement la chaleur provenant du soleil, comme il concerne également la chaleur produite par certaines industries (industrie métallurgique, centrale à gaz, centrale d'incinération…).

Les technologies de stockage de l'énergie thermique peuvent être classifiées dans diverses catégories selon différents critères *(cf. figure III.8)*. Si le critère est la plage de température, les systèmes de stockage sont divisés en « stockage de la chaleur » et « stockage du froid » [46], [47], [36] et [37]. Dans le cas où le critère est la durée de stockage deux classes sont considérées, « le stockage long terme » et le stockage « court terme ». D'autre part, si le critère est l'état du matériau de stockage, il existe trois principaux types : « stockage par chaleur sensible », « stockage par chaleur latente », et « stockage par chaleur thermochimique » [37][38]. Les systèmes de stockage de l'énergie thermique peuvent aussi être classés en deux autres catégories : actifs ou passifs [48][39]

Le terme de stockage actif est utilisé dans le cas où le matériau de stockage circule dans le système. À l'opposé, dans le cas d'un système de stockage d'énergie thermique passif (aussi appelé régénérateur), le matériau de stockage ne circule pas dans le procédé.

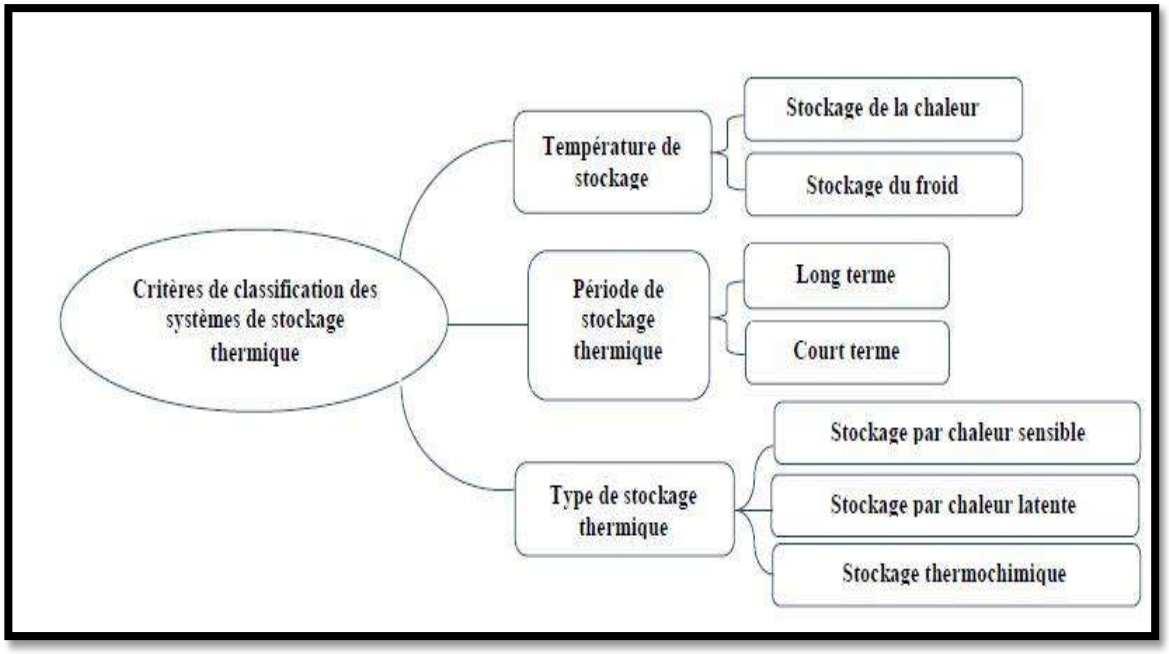


Figure III.8. Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique.

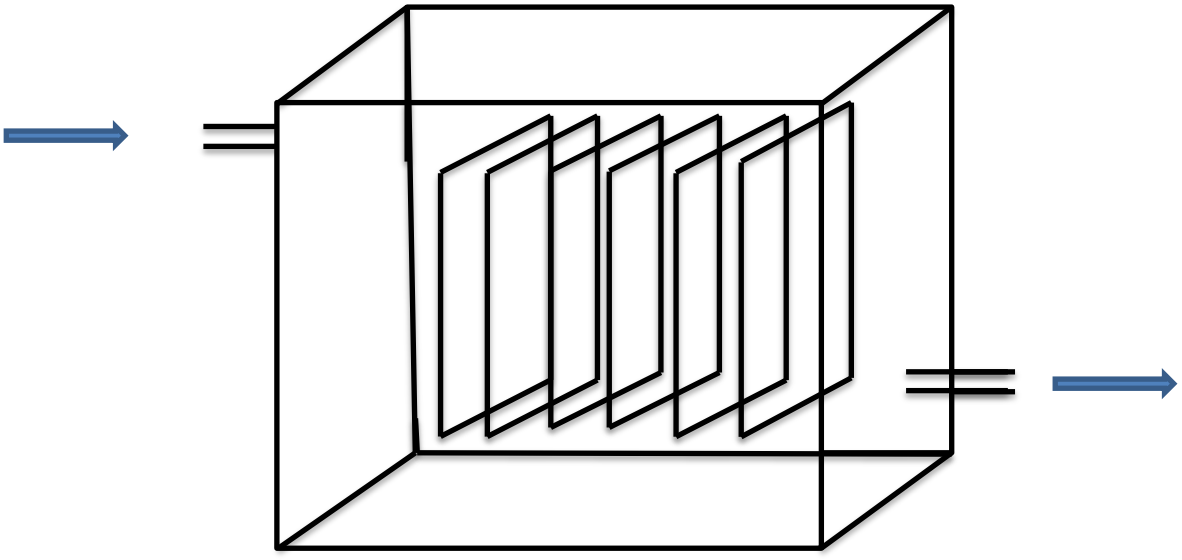


Figure.III.9.Shéma d'un réservoir contient de plaque solide

III.2.2 Types de stockage de l'énergie thermique

III.2.2.1- Stockage thermique thermochimique:

Les systèmes de stockage par voie thermochimique sont basés sur une réaction thermochimique renversable du matériau de stockage avec un fluide. La réaction thermochimique consomme ou libère de la chaleur par dissociation ou combinaison de deux réactifs.

Les réactions solide-gaz sont particulièrement adaptées pour pouvoir facilement séparer et stocker les réactifs, sans pertes, pour de longues durées. Plus délicat à maitriser, les systèmes de stockage thermochimique peuvent atteindre en théorie des densités de stockage intrinsèques supérieures à celles des systèmes par chaleur sensible ou latente. De plus, ils permettent d'ajuster la température de réaction en régulant la pression de gaz réactif.

Suivant le choix du réactif, ces systèmes de stockage peuvent être utilisés dans de nombreuses applications de stockage ayant des gammes de température différentes

a) Avantages

- Vaste gamme de température de stockage : allant du froid jusqu'à 250°C
- Densité énergétique élevée par rapport aux autres systèmes de stockage
- Possibilité de transporter la chaleur ou le froid stocké
- Non toxique et non néfaste pour la santé et l'environnement
- Faible chute d'efficacité au cours du temps

b) Inconvénients

- Complexité de la technologie et complexité d'intégration entre source et puits de chaleur
- Temps de charge long, limité par le transfert de masse dans le système

III.2.2.2Stockage par chaleur latente

***a*) Principe**

La chaleur latente est l'énergie associée à un changement d'état. Lors du processus de stockage, une grande quantité d'énergie peut être emmagasinée autour de la température de changement d'état [42]et [41].

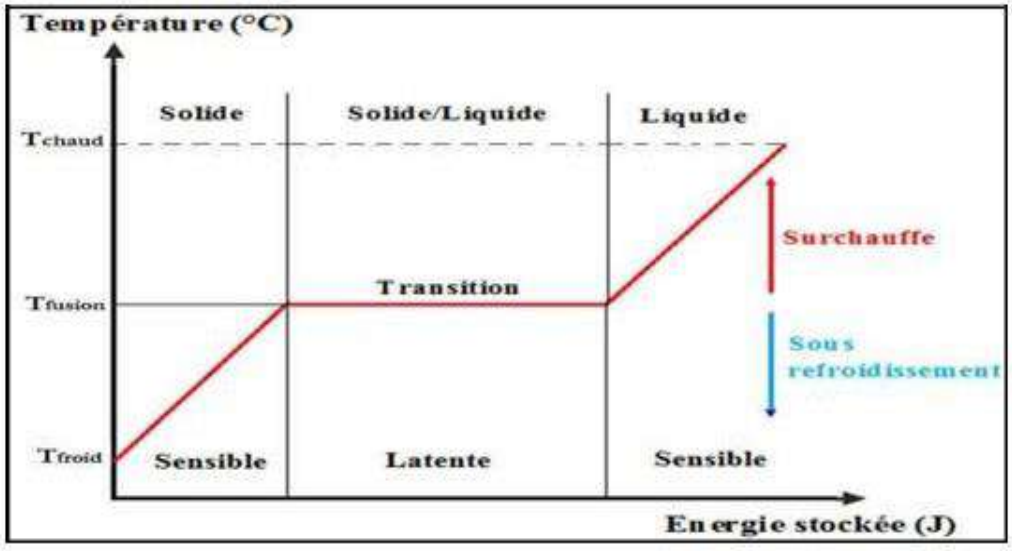


Figure III-9 : Les différentes étapes de stockage de la chaleur par un matériau en fonction de la température.

Les matériaux utilisés sont appelés matériaux à changement de phase (MCP). La plupart des systèmes de stockage par chaleur latente sont des solides, ce qui fait que l'énergie est stockée sous forme de chaleur latente de fusionL_f est définie d'après [42] comme suit :

$(Tfusion) = h_L(Tfusion) - h(Tfusion)$ (39)

Où $h_L(T_{fusion})$ et $h_S(T_{fusion})$ sont les enthalpies massiques du liquide et du solide à la température de fusion. Pendant le changement de phase des matériaux, la chaleur peut être stockée de façon isotherme, dépendant ainsi de la chaleur latente du matériau et de la quantité de matériau utilisée. Durant l'étape de charge, l'énergie thermique fournie au matériau permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe.

Ce changement d'état se fait à température constante et l'énergie apportée par l'extérieur sert alors à rompre les liaisons existantes dans le solide. Une fois que la matière est

Entièrement transformée de l'état solide à l'état liquide et si le système continue à recevoir de l'énergie, alors celle-ci sera de nouveau cumulée par le matériau sous forme de chaleur sensible. Lors de l'étape de décharge, le matériau change de nouveau la phase à la même température durant le processus de charge et reprend son état initial en libérant la chaleur.
La quantité d'énergie stockée dans le MCP est la somme de l'énergie sensible et de l'énergie latente suivant la relation (40). La majeure partie de l'énergie stockée est comprise dans l'enthalpie de changement de phase du matériau. L'état final correspond à l'état d'équilibre.

$$Q = \int_{T_{froid}}^{T_{fusion}} m.c_p.dT + mlf + \int_{T_{fusion}}^{T_{chaud}} m.c_p.dT \qquad (40)$$

Où, Q est la quantité d'énergie stockée (J), m est la masse du matériau de stockage (kg), C_{Ps} et C_{Pl} sont respectivement les chaleurs spécifiques des matériaux solide et liquide ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), L_f est l'enthalpie de changement de phase ($J.kg^{-1}$) ou la chaleur latente et d_T est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K).

***a*) Avantages :**

- Pallie le décalage entre la production de chaleur fatale (récupération d'énergie) et les besoins en chaleur sur le site (utilisation de l'énergie récupérée).
- Densité énergétique importante par rapport au stockage sensible
- Température de décharge stable
- Chimiquement stable
- Non toxique

b) Inconvénients :

Faible conductivité thermique $\left(\lambda \square \ \frac{0.5w}{m}k\right)$ limitant les vitesses de charge et de décharge et imposant de grandes surfaces d'échange

- Durée de stockage limitée (pertes thermiques)
- Température de fusion limitée
- Couts relativement importants comparés au stockage sensible

III.2.2.3-Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible

a) Principe

Dans le cas du stockage par chaleur sensible, l'énergie est emmagasinée via l'augmentation de température du matériau. Ce mode de stockage est le moyen le plus ancien, le plus simple et le moins onéreux d'emmagasiner de l'énergie. La quantité d'énergie stockée est directement proportionnelle à la masse, à l'écart de température, et à la chaleur spécifique du matériau de stockage. Dans ce cas, le matériau cède ou stocke de l'énergie dans une gamme de températures excluant le changement d'état. En effet, si la température s'élève de Ti à Tf pour un matériau de masse m, la quantité de chaleur Q stockée ou récupérée par ce matériau est équivalente à la variation de l'enthalpie du corps ΔH :

$$\boldsymbol{Q = AH = \int \rho . V . C_P . (T) dT} \qquad (41)$$

Où Q est la quantité d'énergie stockée (J), ρ est la masse volumique du matériau de stockage (kg), V est le volume de matériau (m^3), Cp est la chaleur spécifique du matériau de stockage ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) et dT est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K).

En supposant la capacité calorifique indépendante de la température, la relation (41)

devient :

$$Q = \rho . V . (T_f - T_i) \qquad (42)$$

L'équation (42) indique que les propriétés importantes pour un matériau de stockage sont la masse volumique et la chaleur spécifique. Pour un volume donné, un matériau stockera d'autant plus de chaleur que le produit $\rho_C P$ sera élevé.

D'autres propriétés sont importantes, telles que la conductivité thermique, la diffusivité thermique, le coefficient de dilatation thermique, la stabilité cyclique, l'abondance, le coût et l'empreinte environnementale [44][50]. Il indique aussi que ce type de stockage est efficace dans le cas de systèmes fonctionnant dans de larges intervalles de température.

.

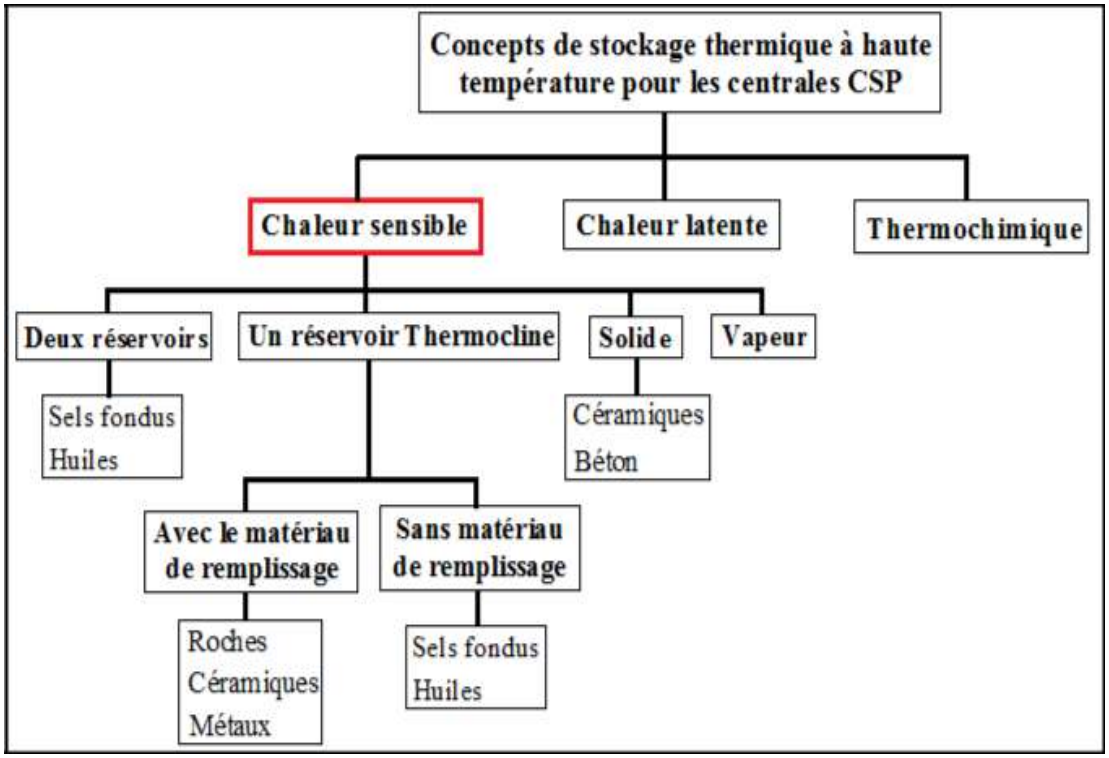


Figure.III.10.Les concepts de stockage de la chaleur sensible à haute température

III.2.2.4-Lit entassé de roches

a) Principe

Par définition, un lit entassé de roches est un milieu poreux formé de roches autour desquelles existent des espaces vides appelés pores. Ces vides peuvent être occupés par un fluide caloporteur. La forme du lit couramment utilisé est cylindrique. Ainsi, les lits de forme conique tronqué et rectangulaire sont aussi utilisés pour le stockage thermique

Le lit de roche utilisant l'air comme fluide caloporteur est devenu l'une des solutions les plus optimales pour le stockage thermique dans les centrales solaires car il offre plusieurs avantages tels que les coûts d'investissement faibles, l'efficacité, la fiabilité et le respect de l'environnement [46] [52]. Il est bien adapté pour les centrales CSP puisqu'il s'agit d'une technique simple permettant un rendement thermique global élevé. Selon Heller et Gauche et Barton et al, il n'a pas besoin d'un échangeur de chaleur supplémentaire entre le collecteur et le réservoir de chaleur. En plus, Pacheco et al. Ont démontré que la mise en œuvre d'un stockage thermocline sur un lit de roches permet une diminution de 34 % de l'investissement financier en comparaison avec une technologie utilisant un stockage avec deux réservoirs.

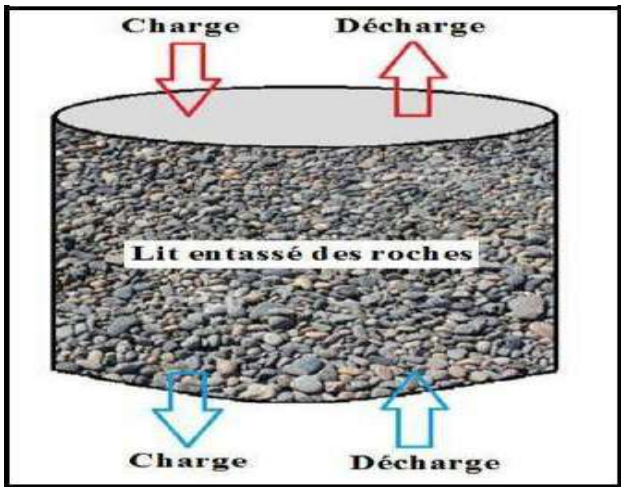


Figure.III.4: Schéma de principe de fonctionnement d'une unité de stockage de lit entassé de roches.

Lors de charge, le fluide chaud (FC) reçu à partir des capteurs solaires est introduit dans le lit par la partie supérieure. En descendant, il transfère ses calories aux roches et il sort ensuite avec une température presque égale à celle des couches inférieures.

Ainsi, la température des couches supérieures est beaucoup plus importante que les autres parties du lit (stratification thermique). Lors de décharge, lorsque l'énergie est nécessaire, le fluide froid (FF) est introduit dans le lit par la partie inférieure. En ascendant, il enlève la chaleur emmagasinée dans les roches. Le sens choisi de l'écoulement d'air lors de charge et décharge du réservoir permet d'augmenter la surface de contact solide/fluide et le transfert thermique, ainsi que de maintenir la stratification thermique dans le lit.

Contrairement aux cas de deux réservoirs, un réservoir unique utilise un gradient thermique pour séparer la zone chaude ZC de la zone froide ZF. La (figure III-11) présente le principe de fonctionnement de la zone dite « thermocline » [47][40]. Cette zone peut représenter jusqu'à un tiers de la hauteur du réservoir.

Elle se déplace axialement suivant les phases de charge ou de décharge. En général, une vitesse du fluide caloporteur faible est nécessaire pour permettre la formation de cette zone. Cela impose un flux laminaire à travers le lit de roches et donc un faible nombre de Reynolds de l'ordre de 500.

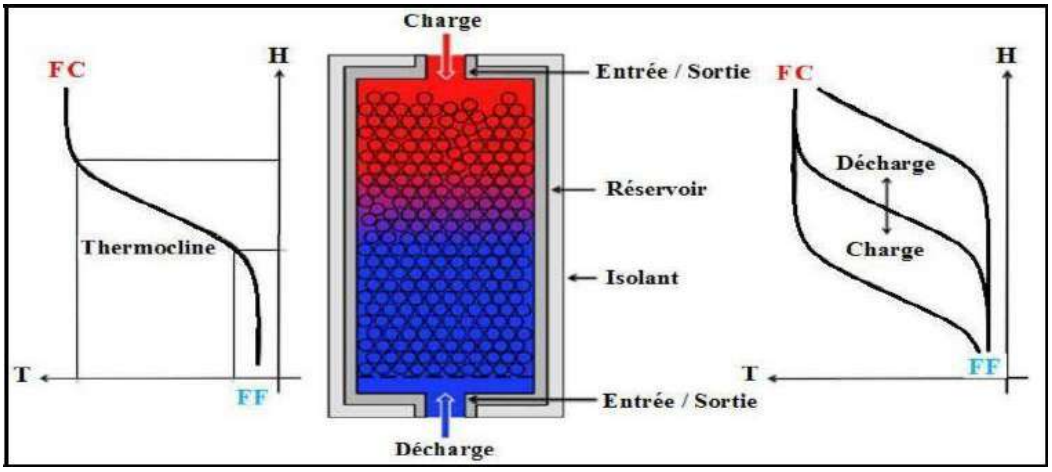


figure.III-11**:** Stockage thermocline sur lit de roche [40].

Pour décrire le transfert de chaleur dans le lit de roches, les mécanismes suivants sont rencontrés : conduction thermique à travers le fluide caloporteur, conduction à travers les particules, conduction à travers les surfaces de contact entre deux particules, transfert radiatif entre les surfaces des particules et transfert thermique convectif fluide- particule (Figure III-12). Habituellement la différence de température entre le fluide et la particule est de 0,5°C environ. [40][47].

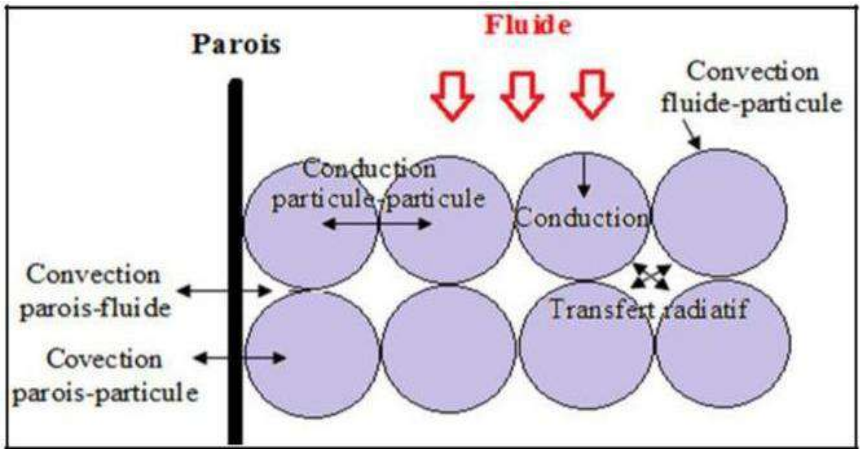


Figure III-12. Echanges de chaleur dans un lit de roches [6].

Un inconvénient majeur du système de stockage thermocline sur le lit de roches est la possibilité d'une fatigue mécanique du matériau de stockage et de la paroi du réservoir

pendant le cyclage thermique. En effet, les parois du réservoir se dilatent lors du stockage entrainant une augmentation du diamètre. Combiné au cyclage thermique des roches, ce stress mécanique répété peut provoquer une rupture de la paroi du réservoir. **Chaleur sensible**

b) Fluides de transfert de chaleur :

Un fluide caloporteur également appelé le fluide de transfert de chaleur (FTC) est un fluide qui permet le transport de chaleur d'un endroit à un autre. Il permet de faire le lien entre le récepteur solaire et le groupe de puissance en transférant la chaleur du premier au second.

Le FTC doit avoir les propriétés suivantes : un point de solidification au voisinage de la température ambiante, des propriétés thermiques et thermo- physiques élevées pour favoriser les transferts de chaleur dans le récepteur solaire et pour participer pleinement au processus de stockage.

Une viscosité plus faible possible pour limiter la puissance de la pompe, une corrosivité négligeable avec les matériaux de contact (tube et réservoir) et les matériaux de stockage, une faible toxicité, inflammabilité et explosivité pour éviter tout incident malencontreux durant l'utilisation, un respect à l'environnement, et une disponibilité en grande quantité pour ne pas être un frein au développement des centrales solaires

Tableau.III.2 : Comparaison de l'air avec le Therminol VP1 et l'huile végétale de colza

Fluide colporteur	Huile thermique : Therminol VP1	Huile de colza	Air
Composition	73.5% oxyde de diphényle et 26.5 % de diphényle	Acidegras	21 % O2 et 78 % N2
Temperature de solidification	12 °C	-21 °C	-
Temperature maximale d'utilisation	400 °C	250 °C	Très élevée
Pression de vapeur	10.9 bars à 400 °C	0 bars à 300 °C	1.01 bars à 100 °C
Capacité de stockage thermique (250 °C)	1.89 MJ/m^3.K	2.02 MJ/m^3.K	0.70 MJ/m^3.K
Conductivitéthermique (250 °C)	0.106 W/m.K	0.139 W/m.K	0.042 W/m.K
Viscositédynamique (250 °C)	0.29 mPa.s	2.5 mPa.s	2.26 10^{-5} kg.m^{-} 1.s-1
Compatibilitéchimique	-	Bonne	Très bonne
Coûtd'investissement	5.7 € kg^{-1}	0.8 € kg^{-1}	Nulle
Disponibilité	Faible	Elevée	Partout
GES	3 kg CO2 eq kg^{-1}	2 kg CO2 eq kg^{-}	Nulle
Dangerosité	Elevée	Faible	Nulle

En comparant les FTC trouvés dans la littérature, l'air est le plus abondant, le moins cher et disponible partout. Il est inflammable, non toxique, non dégradable et écologique. Il peut fonctionner à haute température. Selon Coutier et Faber, le système le plus approprié pour stocker la chaleur utilise l'air comme FTC. De plus, avec l'air, l'opération de stockage est également simple.

***a*) Avantage :**

Pallie au décalage entre la production de chaleur fatale (récupération d'énergie) et les besoins en chaleur sur le site (utilisation de l'énergie récupérée)

b) Inconvénients :

Encombrement

Pertes d'énergie

III.2.3-Comparaisons des différents types de stockage thermique :

Le tableau III-2 représente les caractéristiques des trois types de stockage de la chaleur. Six paramètres fondamentaux ont été choisis : la densité énergétique, la température de stockage, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre du système, les avantages du matériau de stockage et les inconvénients du système. Actuellement le stockage par chaleur sensible est le procédé de stockage thermique le plus mature.

Sa maturité, le stockage par chaleur sensible est bien implantée dans l'industrie du solaire thermique. Elle est utilisé industriellement dans plusieurs centrales solaires thermodynamiques surtout celles qui utilisent deux réservoirs de stockage en sels fondus.

Tableau.III.3.Caractéristiques des différents systèmes de stockage de la chaleur

Stockage		*Sensible*	*Latente*	*Thermochimique*
Densité énergétique	*Volumique*	15-60 kWh/m³	50-100 kWh/m³	100-500 kWh/m³
	Massique	0.02-0.03 kWh/kg	0.05-0.1 kWh/kg	0.5-1 kWh/kg
Température de stockage		Température de charge	Température de charge	Température de charge ou température ambiante
Maturité		Echelle industrielle (20 MWe)	Echelle pilote (100 kWth)	Echelle laboratoire (1-5 kWth)

Technologie	Simple	Moyenne	Complexe
Avantages du matériau de stockage	Bon marché, simple à contrôler	Densité énergétique élevée, température isotherme	Densité énergétique élevée
Inconvénients	Grand volume, faible densité énergétique	Cristallisation, matériaux chères, corrosion	Mauvais transfert de chaleur à sorption

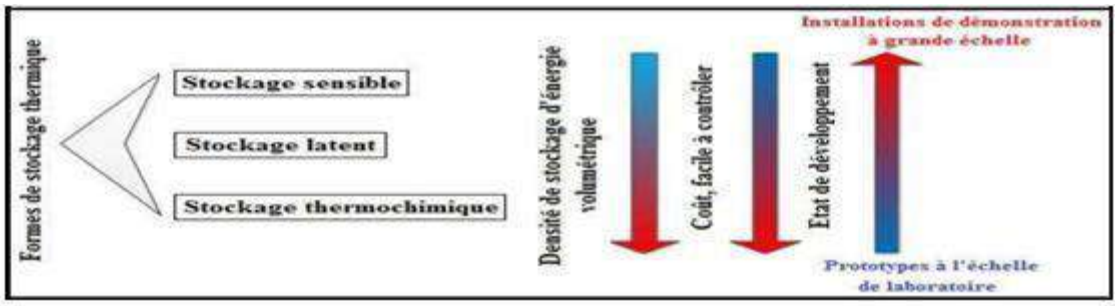


Figure III-13 **:** Les différentes formes de stockage thermique [49]

III.2.5-MODEL MATHEMATIQUE

Le modèle mathématique du réservoir de stockage de l'énergie solaire thermique est basé sur les équations de l'énergie pour le fluide et le matériau solide (plaques parallèle) comme illustré dans l'équation ci-dessous;

$$\varepsilon\rho_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \varepsilon_f u_f \rho_f c_f \frac{\partial T}{\partial x} = \varepsilon\lambda_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + a_p h\left(\theta - T_f\right)$$

$$\left(1-\varepsilon\right)\rho_s c_s \frac{\partial \theta}{\partial t} = \left(1-\varepsilon\right)\lambda_s \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + a_p h\left(T_f - \theta\right)$$

La résolution des équations de l'énergie pour le fluide caloporteur et le solide sous forme plaques parallèles est basé sur la discrétisation de ces équations par la méthode des différences finies schéma implicite. Un code de calcul a été établi par utilisation du logiciel de Matlab. Les équations discrétiser sont solutionnées par l'algorithme de Thomas TDMA

Chapitre 4

Résultat et Discussion

IV.1-Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les principaux résultats issus des équations de l'énergie qui sont considérées pour caractériser le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau de stockage. Les équations de l'énergie sont discrétiser par la méthode des différences fines schéma implicite. Un code de calcul a été développé en utilisant le logiciel du Matlab. Les résultats obtenus incluant les champs de température sont analysés et discutés L'objectif principal de notre étude est d'évaluer la performance thermique du système à travers la variation des champs de température en régime transitoire suivant les hypothèses simplificatrices :

1. La chaleur spécifique du solide et de fluide est considérée constante.
2. La conductivité thermique est constante.
3. Le problème de stratification de température au niveau du réservoir est nigligé.
4. Le phénomene de changement de phase au niveau du matériau solide est nigligé.
5. La transfert de chaleur se fait en regime transitoire et monodimensionnel.

IV.2-Les résultats et interprétations

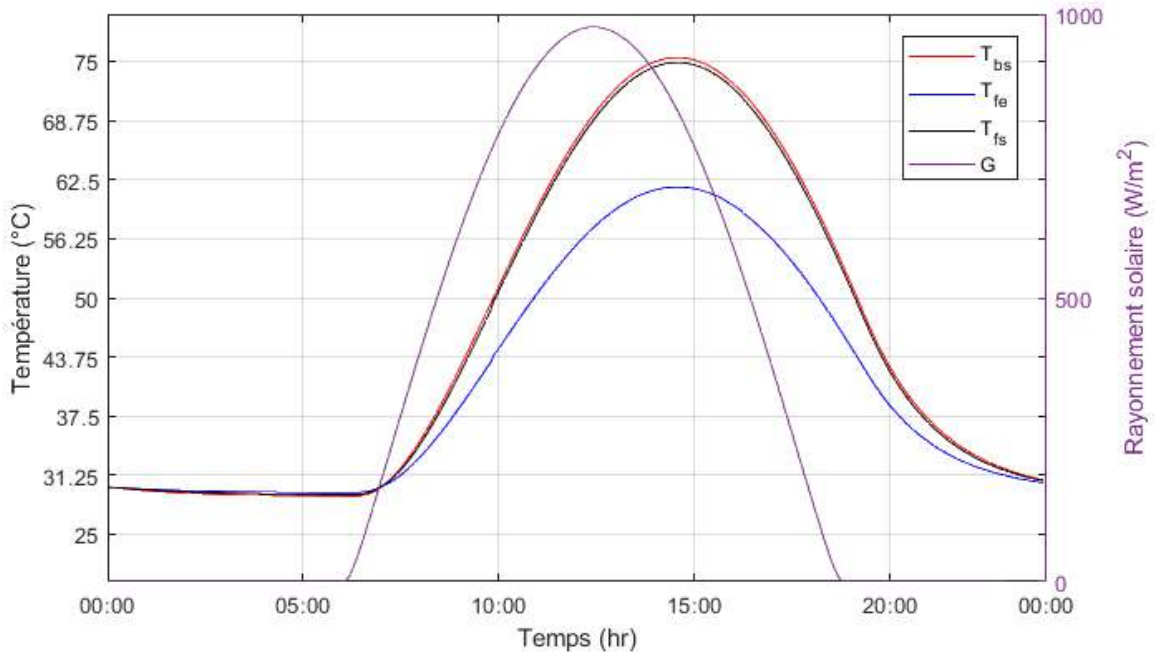


Figure.IV.1- variation horaire du rayonnement solaire et la température du fluide

La figure IV.1 représente la variation du rayonnement solaire et la température du fluide en fonction de temps. On observe que le rayonnement solaire G dans les périodes [00:00 à 06:00] et [19:00 à 00 :00] sont nul, Il a une valeur maximale à 12h . On observe aussi que la température Tbs En accord avec le rayonnement solaire, Il a une valeur maximale à 12h. C'est-à-dire, après avoir passé le fluide dans le bassin solaire on conclu que la temperature de bassin à une relation directe avec le rayonnement solaire.

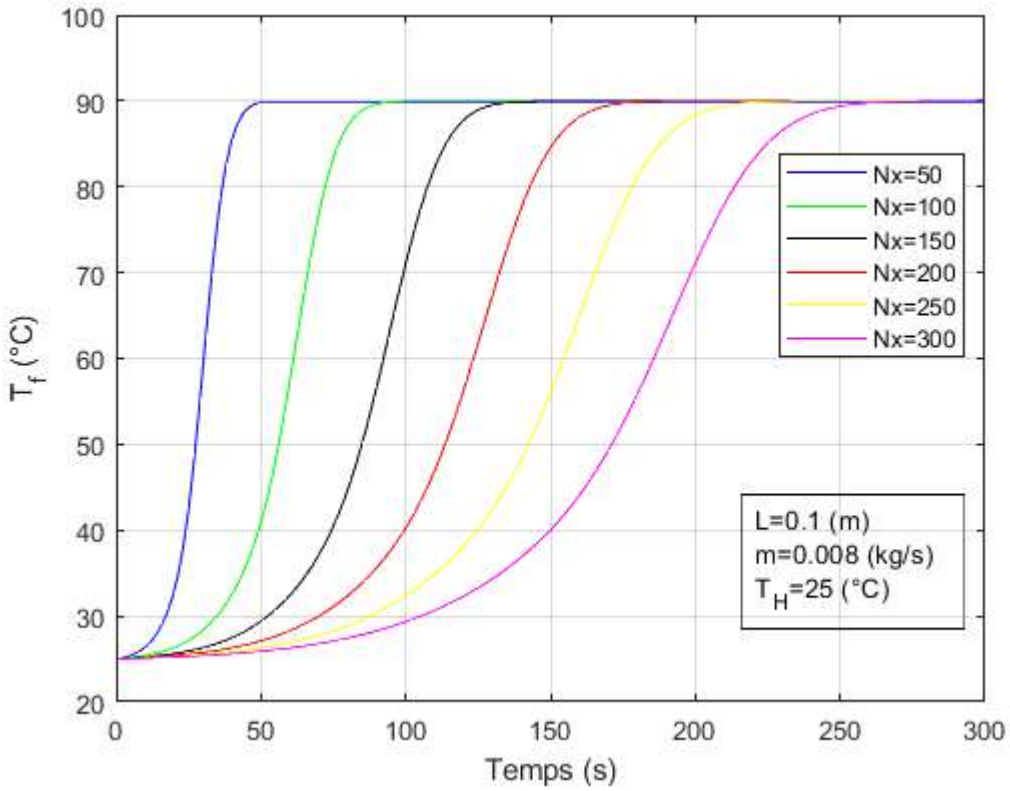


Figure.IV.2- Evolution de la température de fluide caloporteur en fonction du temps pour les differents nœuds

La figure.IV.2.represente l'evolution de la température de fluide caloporteur en fonction du temps pour differents valeurs des nœuds avec les paramètres de fonction (L=0.1(m) , m=0.008 (kg /s) et T_H =25(°C)). On remarque que les évolutions des températures pour chaques noeuds sont identiques et que les premiers noeuds ont des augmentations des températures est rapides par rapport aux derniers noeuds.

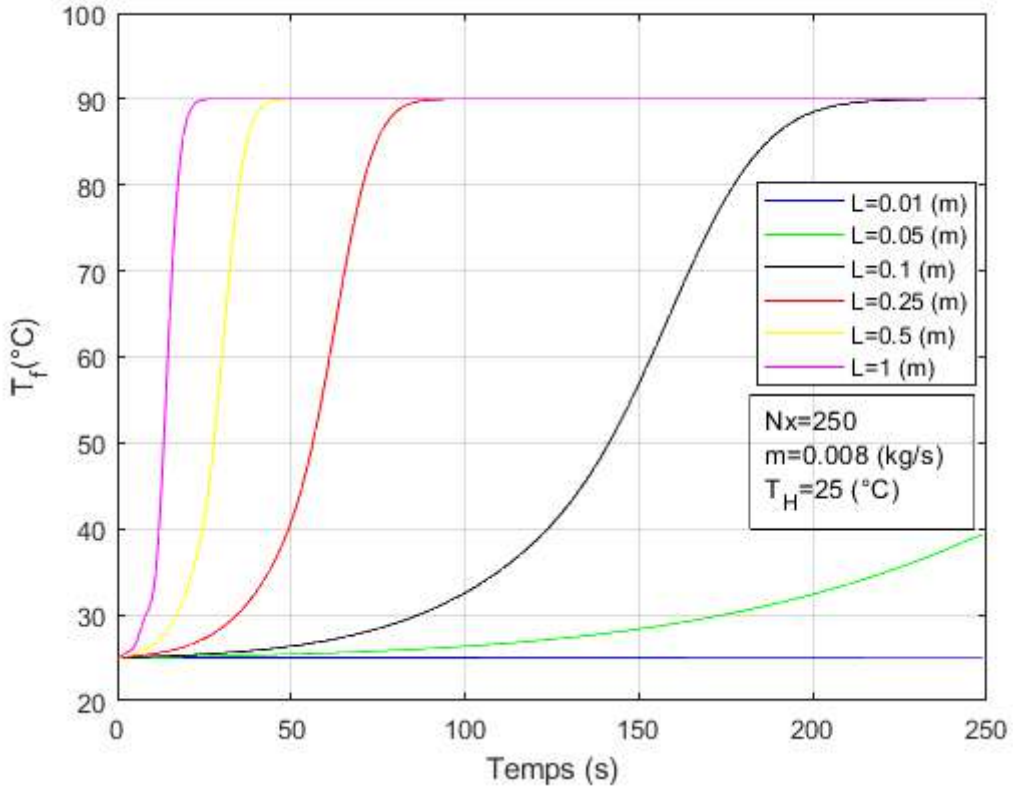


Figure.IV.3- l'évolution de la température calculée du fluide caloporteur en fonction du temps avec une augmentation de la longueur de réservoir.

La figure.IV.3- montre l'évolution de la température calculée du fluide caloporteur en fonction du temps avec une augmentation de la longueur du réservoire de stockage pour les paramètres d'opérations (Nx=250,m=0.008(kg/s) et T_H =25(°C)). Il est claire que T_f est inversement proportionnel à L pendant les heures d'ensoleillement, à mesure que la profondeur du réservoir augmente et que le temps nécessaire pour atteindre la température maximale augmente.

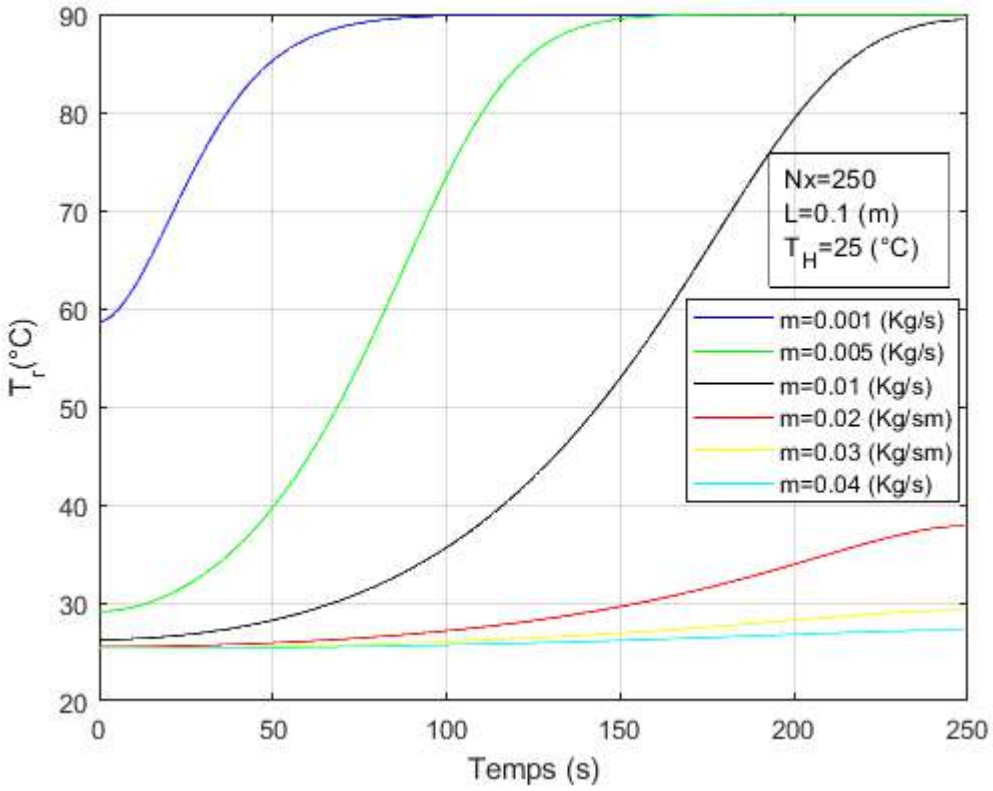


Figure.IV.4- l'évolution de la température de réservoir pour différents valeurs de débit massique en fonction de temps.

La figure.IV.4. Montre l'évolution de la température de réservoir de stockage pour différents valeurs de débit massique en fonction de temps. Il est claire que la température de réservoir est directement proportionnelle au débit massique du fait de l'augmentation de la durée d'absorption de chaleur de et la plaque absorbante qui permet d'augmenter le taux d'énergie transférée de réservoir.

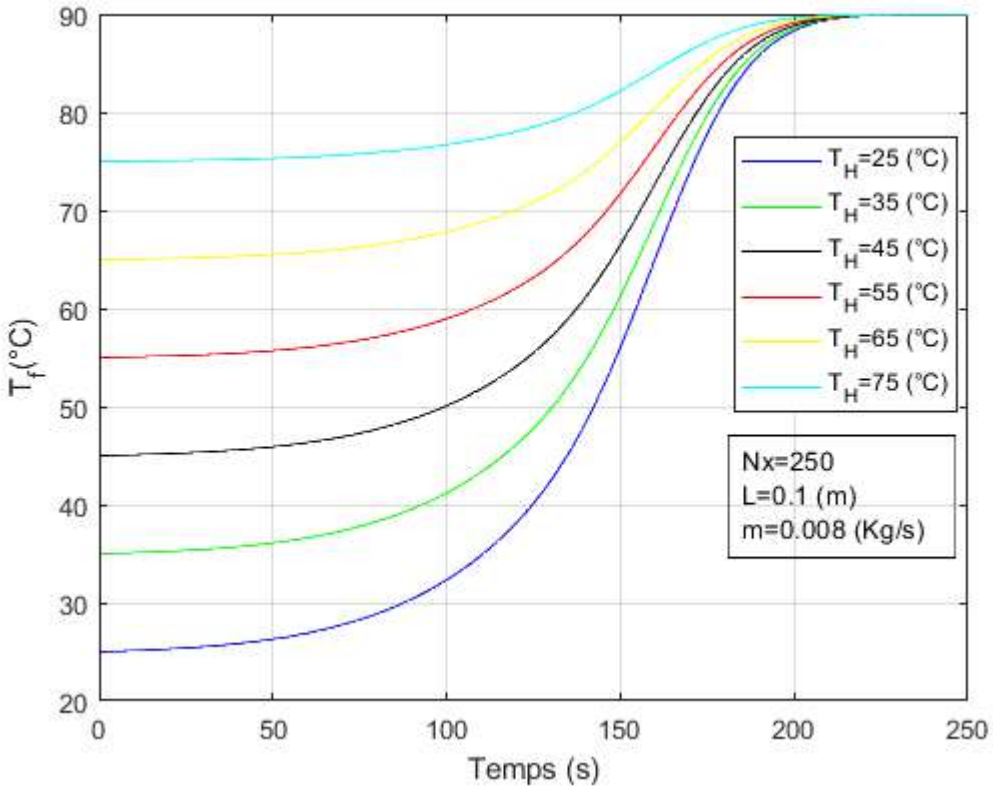


Figure.IV.5-l'évolution de la température de fluide caloporteur en fonction du temps

La figure.IV.5. Represente l'evolution de la température de fluide caloporteur en foction de temps.avec les paramètres de fonctionnement (Nx=250,L=0.1(m) et m=0.008(kg/s)).

Pour differents valeurs de temperature T_H :25°C ,35°C,45°C,55°C ,65°C ,75°C . On note que le temps nécessaire au fluide caloporteur pour atteindre sa température maximale est égal.

On conclu que la température T_H n'a aucune influence a la température de fluide caloporteur.

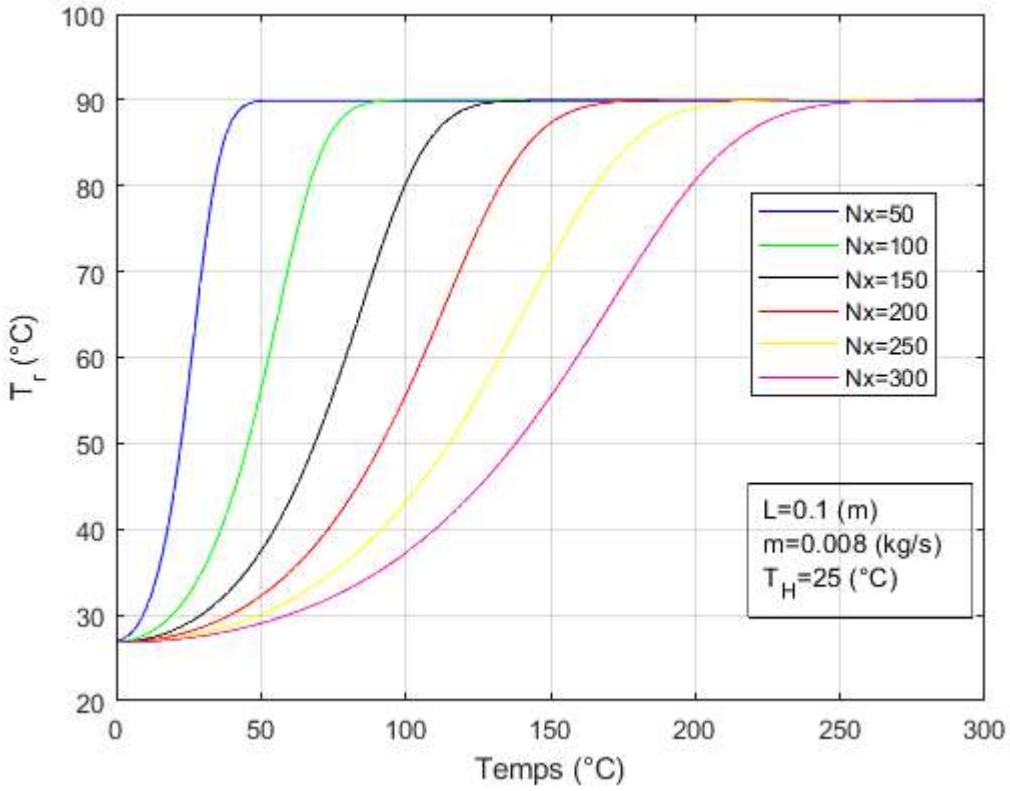


Figure.IV.6-l'evolution de la température de réservoir en fonction du temps pour défferentes nœuds.

La figure.IV.6.represente l'evolution de la température de réservoi en fonction du temps pour differentes nœuds avec L=0.1(m) , m=0.008(kg /s) et T_H =25(°C). On remarque que les évolutions des températures pour diffirents valeur des noeuds sont identiques et que les premiers noeuds ont des augmentations des températures est rapides par rapport aux derniers noeuds.

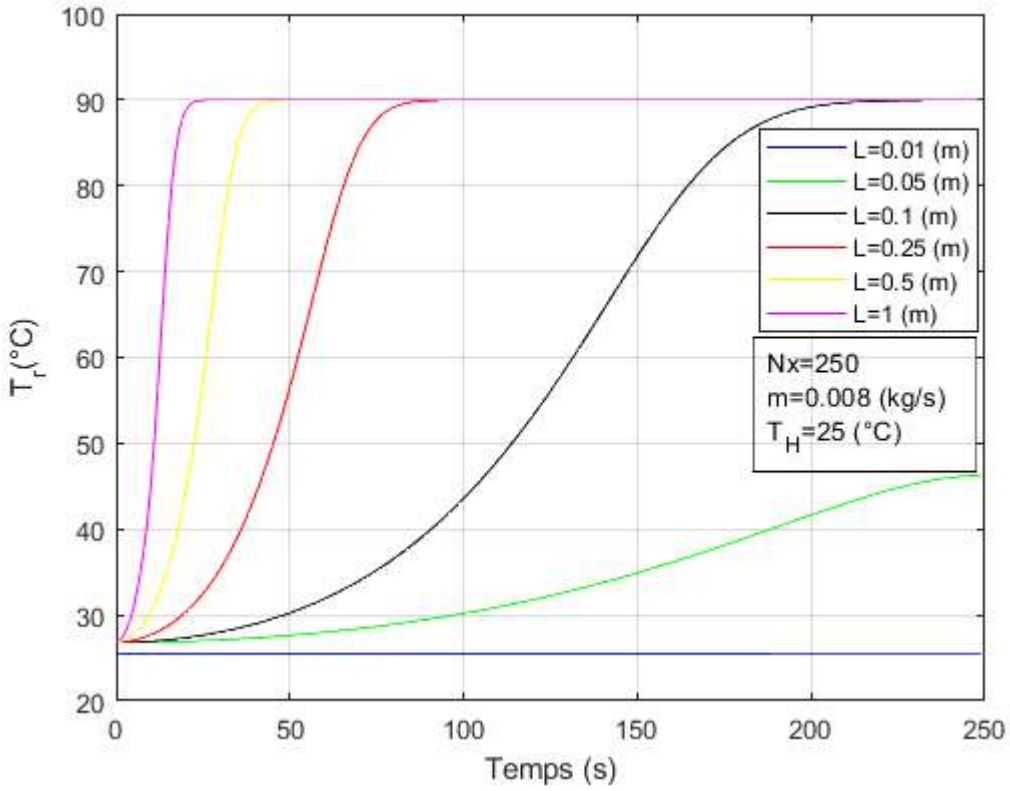


Figure.IV.7-l'évolution de la température calculée de l'eau en fonction du temps avec une augmentation de la longueur du réservoir

La figure.IV.7 montre l'évolution de la température calculée de l'eau du réservoir en fonction du temps avec une augmentation pour différents valeur de la longueur du réservoir, où l'on remarque un écart dans le temps nécessaire pour atteindre la valeur la plus élevée C'est pour une valeur estimées par : Il est clair que Température du réservoir est inversement proportionnel à longueur du réservoir car le temps nécessaire à la montée en température dans le réservoir augmente avec l'augmentation de la longueur.

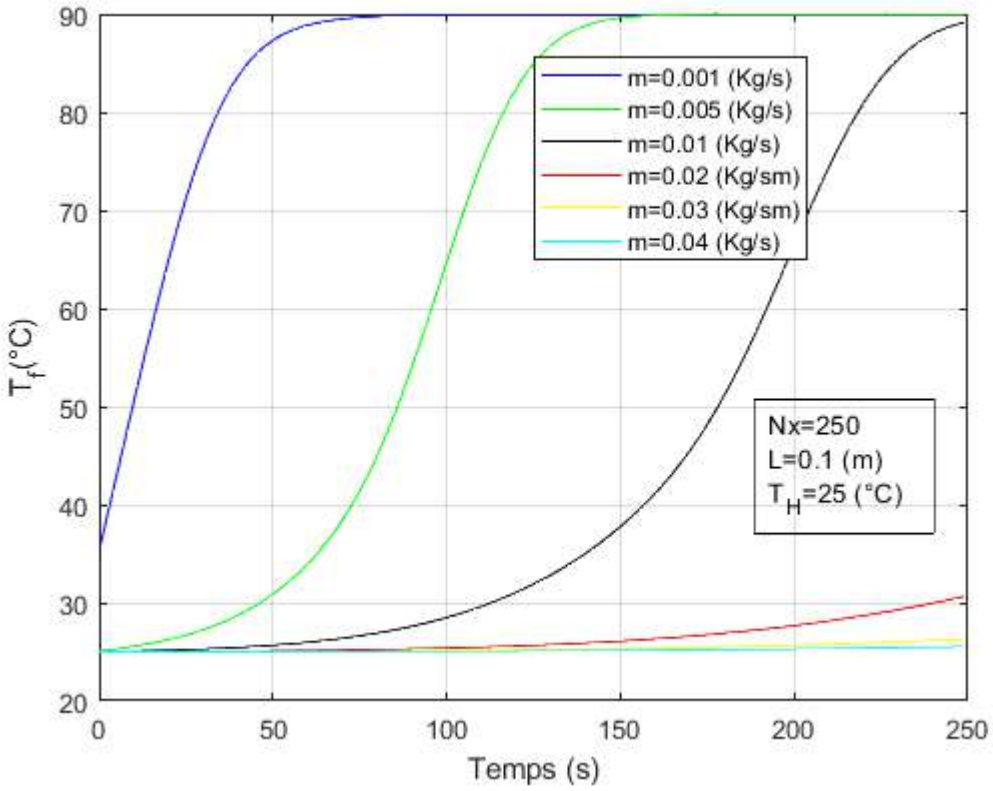


Figure.IV.8-l'évolution de la température du fluide caloporteur avec le débit massique

La figure.IV.8. Montre l'évolution de la température du fluide caloporteur avec le débit massique. Il est claire que la température du fluide caloporteur est directement proportionnelle au débit massique du fait de l'augmentation de la durée d'absorption de chaleur de la plaque absorbante qui permet d'augmenter le taux d'énergie transférée au fluide caloporteur.

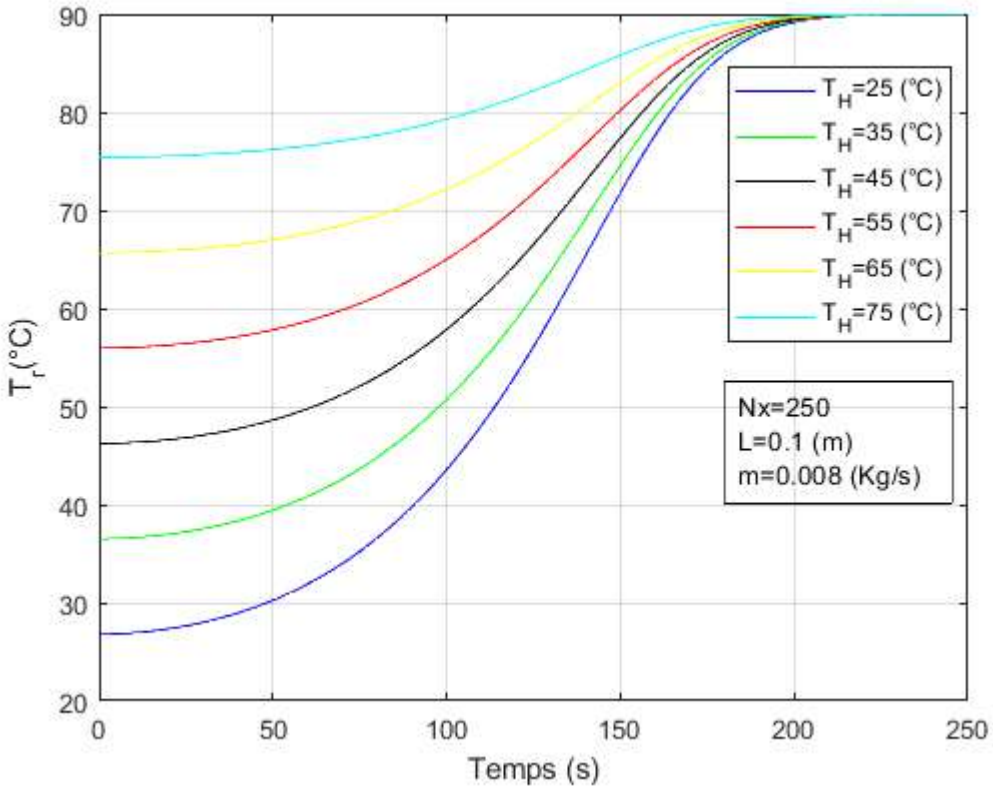


Figure.IV.9-l'évolution de la température calculée du réservoir en fonction du temps

La figure.IV.9. represente l'evolution de la température du réservoir en fonction de temps avec les paramètres d'opérations:(Nx=250,L=0.1(m) et m=0.008(kg/s)). C'est-à-dire pour differents valeurs de temperature T_H :25°C ,35°C,45°C,55°C ,65°C ,75°C . On conclu que la température TH n'a aucune influence a la température du réservoir. On constate que le temps nécessaire à la cuve pour atteindre sa température maximale est égal.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présent dans ce mémoire traite l'étude de performance de stockage de l'énergie solaire thermique issu d'un bassin solaire raccordé avec un réservoir.

Un code de calcul sous Matlab monodimensionnel a été développé pour caractériser l'échange thermique entre le fluide caloporteur et les plaques solide situé au niveau du réservoir de stockage.

Les équations de l'énergie ont été solutionnée par la méthode des différences finies schéma implicite. La vitesse de débit massique et la profondeur de réservoir est les principaux facteurs qui affectent le changement de température des plaques immergé dans réservoir et le fluide caloporteur.

Le stockage de l'énergie solaire thermique est un facteur important pour l'économie de l'énergie durant toute l'année et ce, peut être visualisé par généralisation de l'étude à travers 12 mois de l'année.

Bibliographie

Bibliographie

[1] O. Ketfi, M. Merzouk, N. Kasbadji Merzouk, S. Elmetenani et D. Lafri Article : Etude expérimentale d'un capteur solaire plan muni .d'un collecteur sous forme de serpentin, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER 42004, Tipaza, Algeria (2014).

[2] A.A. El-Sebaii, S. Aboul-Enein, M.R.I. Ramadan, A.M. Khallaf, Article: Thermal Performance of shallow solar pond under open and closed cycle modes of heat extraction. Egypt. (2013).

[3] C. Le rouge, Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) aux Etats-Unis, Science Physique, 2006.

[4] J. Labbe « l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour Système photovoltaïque isolés », thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 21 décembre 2006.

[5] J. Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ».Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008

[6] G. Cunty. Eoliennes et aérogénérateurs. Guide de l'énergie éolienne, Ed: Edisud Te chnologies douces.

[7] Désiré Le Gourières. Energie éolienne théorie, conception et calcul pratique des installations. , Ed:Eyrolles.

[8] Axenne, «petit éolien » Usages raccordes au réseau, conseil général des Landes, 2008

[9] S. Weibel, «Café climat petit éolien», Association Française des Professionnels du P etit éolien, France, 11juin 2013.

[10] The Wind Power. En ligne.<http://www.thewindpower.net/> consulté Le 28 mai 2020.

[11] Wind Power Développement. En ligne. <http://www.telosnet.com/wind/>consulté le 02 juin 2020.

[12] http://www.geothermie-perspectives.fr consulté le 28 mai 2020.

[14] L'encyclopédie Wikipédia, 2006 : Géothermie, retrouvé sur le site www.wikipidia.o

[15] L, Lacas. Le guide des énergies douces. Le soleil, la maison solaire, le vent, la biomasse,

[16] R, Stobaugh ; D, Yergin. L'énergie du futur. Rapport présenté par le groupe du «PROJET ENERGIE », à la Harvard Business School. (1983).

[17] V. quaschning, renewable energy and climate, (2010).

[18] JA, A, Sfeir; G, Guarracino. Ingénierie des systèmes solaires. applications a l'habitat. Technique et Documentation, Paris. (1981).

[19] S.M.A. Bekkouche, Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires, Thèse de Doctorat en Physique Electronique, Université de Tlemcen. , Mai 2009.

[20] M. Capderou, Atlas Solaire de l'Algérie, Tome1, voll et 2: Modèles Théoriques et Expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987

[21] M. Merad, M., Rougab, I., Cheknane, A., & Bachari, N. I. (2012). Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques. Revue des Energies Renouvelables, 15(3), 451-463

[22] Saheb-Koussa, D., Koussa, M., & Belhamel, M. (2006). Reconstitution du rayonnement solaire par ciel clair. Revue des énergies renouvelables, 9(2), 91-97.

[23] A. soteris, kalogirou, solar thermal collectors and applications, progress in energy and combustion science, (30) 231-295 (2004).

[24] O. gergaud, modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couple au réseau et associe a un accumulateur, école normale supérieure de Cachan, France, (2002).

[25] V. quaschning, renewable energy and climate, (2010).

[26] R.foster, M.ghassemi, A.cota, solar energy, renewable energy and the environment, (2009).

[27] A.soteris, kalogirou, solar thermal collectors and applications, progress in energy and combustion science, (30) 231-295 (2004).

[28] J, Bernard. Energie solaire, calculs et optimisation. Ellipse Edition Marketing. Paris. (2004).

[31] RAMAKRISHNA G.R. M., PANDEY K.P., Scope of fertiliser solar ponds in Indian agriculture, Solar Energy. Issue 2 Vol 27 (2002) pp117-126

[29] KISHORE V.V.N., GUINDHI M.R., Rao K.S., Experimental and analytical studies Of shallow solar pond systems with continuous heat extraction, Solar Energy. Vol.36 N°3 (1986) pp245-256.

[30] DAGUENET M., Les séchoirs solaires, théorie et pratique, Unesco, Paris, 1985.

[32] SABETTA F. , PACETTI M., PRINCIPI P. , An internal heat extraction system

Bibliographie

For solar Ponds, Solar Energy .Vol.34N°4/5 (1985) pp297-302.

[33] KISHORE V.V.N., KUMAR A. , Solar pond an exercise in development of Indigenous technology at Kutch, India, Energy for Sustainable Development. Vol 3 N° 1 (1996) pp17-28.

[34] HUSEYIN K., MEHMET O. A. , KORHAN B. , MAKINA E. B. , KARABUK T.E. F., The theoretical and experimental investigation of temperature and salinity gradient in salt gradient solar ponds, J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Vol: 20, N°1 (2005) pp 125-135.