

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

DJALAB Hamida & GHADRI El hadj

Thème

CHAUFFAGE DE SERRE PAR ENERGIE GEOTHERMIQUE

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
BOUAOUINA Lalouani	MCB	Président
AMIRAT Belkacem	MCB	Encadreur
BOUDILMI Aissa	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2019 / 2020

N° d'ordre : GM/...../2020

Remerciement Remerciement

Je remercie Dieu tout puissant de m'avoir accordé la force, le courage et les moyens afin

De pouvoir accomplir ce travail.

Je remercie très chaleureusement notre encadreur Mr Belkacem Amirat.

, Maître-assistant à l'Université de Msila, qui aménagé aucun effort pour que ce mémoire puisse voir le jour. Nous lui exprimons notre gratitude de nous avoir dirigé, encouragé et sur tout l'aide afin de réaliser ce travail.

Je remercie tous les enseignants de notre cursus universitaire qui ont contribué à nous formation.

Merci à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces Dédicaces



J'aime rais avant tout commencer par cette dédicace à mon ami Zid Elkhir Khaled que dieu l'accueille dans son vaste paradis, Tu resteras toujours dans nos cœurs

Amin.

Je tiens à dédier ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers : Mes très chers parents pour qui je n'oublierai jamais leur grande

affection ; leur soutien et leur encouragement ; tout le long de mes études.

A ma mère et à mon père Zouhra et Lakhdar

A mes très chères frères Yahia et Ibrahim et Thamer Rachid

A mes très chères sœurs : Razika et Kheira et Fatiha et Samia

A mes très chers amis : Saaoudi Jaber et Oudadi Aïssa, qu'ils aient m'aide beaucoup

A toute la famille Ghadri, kadri, zoughbi

A toute mes collègues de la promotions 2019-2020

A toutes ceux qui me sont chers et qui sont aujourd'hui absents.

GHADRI ELHADJ



Dédicaces Dédicaces



A mes chers parents.

A mes chers frères et mes chères sœurs.

A ma chère femme.

A mes chers enfants.

A tous mes amis.

*Je dédie ce modeste travail qu'ils veuillent bien
trouver ici l'expression de ma considération et de
ma reconnaissance.*

HMIDA DJALAB



Résumé :

La géothermie est certainement la filière qui présente le plus large spectre d'activités : production de chaleur, production d'électricité, production de chaleur sur réseau, production de chaleur individuelle. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni même de la disponibilité d'un substrat. C'est donc une énergie fiable et stable dans le temps.

Mots clés : géothermie, énergie renouvelable, gradient géothermique

ملخص

الطاقة الحرارية الأرضية هي بالتأكيد القطاع الذي لديه أوسع مجموعة من الأنشطة: إنتاج الحرارة، توليد الكهرباء، إنتاج الحرارة الشبكي، إنتاج الحرارة الفردية. بالمقارنة مع الطاقات المتجددة الأخرى، فإن الطاقة الحرارية الأرضية تتميز بعدم الاعتماد على الظروف الجوية (الشمس، المطر، الرياح)، أو توفر الركيزة. ولذلك فهي طاقة موثوقة ومستقرة مع مرور الوقت

الكلمات المفتاحية: الطاقة الحرارية الأرضية، الطاقة المتجددة، تدرج الحرارة الجوفية

Abstract

Geothermal energy is certainly the sector that has the widest spectrum of activities : heat production, electricity generation, network heat production, individual heat production. Compared to other renewable energies, geothermal energy has the advantage of not depending on atmospheric conditions (sun, rain, wind), or even the availability of a substrate. It is therefore a reliable energy and stable over time.

Key words : geothermal energy, renewable energy, geothermal gradient

Liste des figure

Liste des figure

Figure (I.1): l'énrgie solaire	(4)
Figure (I-2): L'énergie eolienne	(7)
Figure (I-3): composition d'un eolienne	(7)
Figure (I-4): L'énergie hydraulique	(11)
Figure (I-5) : Energie de la biomasse	(12)
Figure (I-6): Energies Les bicarbonates vegetable	(16)
Figure (I-7): la bioethanol	(17)
Figure (I-8): Energie géothermique	(18)
Figure (II-1) : géothermie haute énergie	(22)
Figure (II-2) : géothermie basse énergie	(23)
Figure (II-2) : géothermie très basse énergie	(24)
Figure (III-1) : serre chapelle	(34)
Figure (III-2) : Structure d'une Serre d'horticulture constituée de deux chapelles et de trois modules	(34)
Figure (III-3) : la serre Tunnel	(35)
Figure (III-4) : la serre petit Tunnel	(35)
Figure (III-5) : La serre gonflable	(36)
Figure (III-6) : la serre de multiplication	(36)
Figure (IV-1) : système de modélisation de la serre	(50)
Figure (IV-2) : Mise en évidence des échanges thermiques au travers la serre	(51)
Figure (IV-3) : facteur de forme de serre	(56)

Figure (IV-5) : Température de l'air intérieur et extérieur	(64)
Figure (IV-6) : Humidité relative de l'air intérieur et extérieur	(64)
Figure (IV-7) : Température de l'air intérieur des serres chauffée et témoin	(65)
Figure (IV-8) : Humidité relative : serre chauffée et serre témoin	(65)
Figure (IV-9) : Histogramme cumulé de la production en tomate	(66)

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableaux (I-1) : Matières premières	(14)
Tableau (II.1) : Production électrique par les énergies renouvelables	(27)
Tableau (II-2) : Principales Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie	(28)

Nomenclature

Nomenclature

Symbol	definition	unite
V_h	vitesse d'altitude h	(m/s)
V_{10}	vitesse d'altitude 10 m	(m/s)
V_E	débit volumique	($m^3 / m^2 h$)
V_V	débit de ventilation	m^3 / s
V_G	volume de la serre	m^3
σ	Constant de Stefan –Boltzmann	(w/m^2K^4)
T_s	température du sol	(°C)
T_c	température de la couverture	(°C)
A_s	surface du sol	m^2
T_{ciel}	température équivalente à la Votre celeste	(°C)
A_c	surface de la couverture	m^2
h_{ex}	coefficient d'échange convectif	($W/m^2°C$)
V_c	volume du film	m^3
V_{ai}	volume de l'air intérieur	m^3
K	Coefficient d'échanges conductifs	($w/m °c$)
L	épaisseur du sol égale à 1 mètre	m^2
T_{si}	Température du sol intérieur	(°C)
R_s	La résistance aérodynamique du sol	(m/s)
K_{ch}	coefficient de transfert à travers l'échangeur	($kcal/h/m^2°C$)

A_{ch}	surface du tuyau	(m^2)
T_e	Température d'entrée	$(^{\circ}C)$
T_s	Température de sortie	$(^{\circ}C)$
T_{ML}	Moyenne logarithmique de la température	$(^{\circ}C)$
S_{max}	La surface maximale	(m^2)
C_{ai}	chaleur massique de l'air	$(J/kg^{\circ}C)$
W_{ai}	Humidité absolue de l'air intérie	(kg/k)
T_{si}	température du sol intérieur	$(^{\circ}C)$

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction Générale

Chapitre I : les énergies renouvelables

Chapitre I : les énergies renouvelables

I.1 Introduction	(3)
I.2 Définition des énergies renouvelables.....	(3)
I.3 Les énergies renouvelables	(3)
I.3.1 L'énergie solaire.....	(3)
I.3.1.1 Ressources solaires.....	(4)
I.3.1.2 Techniques d'utilisation de l'énergie solaire.....	(5)
I.3.1.2.1 Solaire passif	(5)
I.3.1.2.2 Solaire thermique.....	(6)
I.3.1.2.3 Solaire thermodynamique.....	(6)
I.3.1.2.1 Solaire photovoltaïque	(6)
I.3.2 Énergie éolienne	(7)

I.3.2.1 Différentes utilisations	(7)
I.3.2.1.1 L'énergie éolienne est utilisée de trois manières	(7)
I.3.2.1.2 Rendement des éoliennes.....	(8)
I.3.2.1.3 Transformation et stockage de l'énergie éolienne	(8)
I.3.2.1.4 Stockage par hydrogène	(9)
I.3.2.1.5 Stockage par batteries	(9)
I.3.2.1.6 Stockage hydraulique	(9)
I.3.2.1.7 Stockage par transformation	(9)
I.3.3 L'énergie hydraulique	(10)
I.3.3.1 Origine	(11)
I.3.3.2 Différentes utilisations	(12)
I-3-4 Energie de la biomasse	(12)
1.3.4.1 Énergie du biogaz	(13)
I.3.4.1.1 Réglementation et historique	(14)
1.3.4.1.2 Composition	(15)
1.3.4.1.3 Rôle dans la transition énergétique	(16)
1.3.4.2 Les bio carburant	(16)
1.3.4.3 Bioéthanol	(17)
I.3.5 L'énergie géothermique	(17)
I.3.5.1 Historique	(18) et (19)
I.3.5.2 Principes	(20)
I.3.5.3 Différents types de géothermie	(20)
I.4 Conclusion	(21)

Chapitre II : Energie géothermique

Chapitre II : Energie géothermique

II.1 Introduction	(22)
II.2 Les différents types de la géothermie	(22)
II.2.1 La géothermie haute énergie	(22)
II.2.2 La géothermie basse énergie	(23)
II.2.3 La géothermie très basse énergie	(23)
II.3 Géothermie roche chaude sèche (HDR)	(24)
II.4 Principe d'exploitation de l'énergie géothermique	(25)
II.5 Les différents systèmes de chauffage	(25)
II.5.1 Le chauffage de type radiatif	(25)
II.5.1.1 Paillage radiant	(25)
II.5.1.2 Thermosiphon	(25)
II.5.1.3 Panneaux radiants	(26)
II.5.1.4 Les avantages et les inconvénients du chauffage de type radiatif	(26)
II.5.2 Le chauffage de type convectif	(26)
II.5.2.1 Aérothermes	(26)
II.5.2.2 Générateurs d'air chaud	(27)
II.5.2.3 Les avantages et inconvénients de chauffage de type convectif	(27)
II.6 La géothermie dans le Monde	(27)
II.7 La géothermie en Algérie	(28)
II.7.1 L'exploration	(28) et (29)
II.8 Avantages et inconvénients de l'énergie géothermique	(29) et (30)

II.9 Conclusion	(31) et (32)
-----------------------	--------------

Chapitre III : Différents types des serres agricole

Chapitre III : Différents types des serres agricole

III.1 introduction	(33)
III.2 La définition d'une serre agricole	(33)
III.3 Description d'une serre	(33)
III.3.1 Les différents types de la serre	(33)
III.3.2 La serre chapelle	(34)
III.3.3 La serre tunnel	(35)
III.3.4 La serre gonflable	(36)
III.3.5 la serre de multiplication	(36)
III.4 Caractéristiques des serres	(37)
III.4.1 Le climat dans la serre	(37)
III.4.2 La lumière	(37)
III.4.3 Température	(37)
III.4.4 l'humidité	(37)
III.4.5 Teneur en gaz carbonique	(38)
III.4.6 l'orientation des serres	(38)
III.4.7 l'effet de serre	(38)
III.4.8 le vent	(39)
III.5 Les aspects spécifiques à la serre	(39)
III.5.1 La photosynthèse	(39)
III.5.2 La respiration	(39)

III.5.3 l'évapotranspiration	(40)
III.6 les sources et le type d'énergie utilisée dans le chauffage des serres	(40)
III.6.1 Géothermie	(40)
III.6.2 L'énergie solaire	(40)
III.6.3 Pompe à chaleur	(41)
III.6.4 Le chauffage de sol	(41)
III.6.5 Les écrans thermiques	(41)
III.6.6 Le chauffage localisé	(42)
III.6.7 Les rejets thermiques industriels	(42)
III.6.8 Le stockage de l'excès de chaleur	(42)
III.7 Conditions climatiques d'une serre	(42)
III.7.1 Échanges thermiques	(42) et (43)
III.7.2 Échanges radiatifs	(43) et (44)
III.7.3 Échanges conductifs	(44)
III.7.4 Échanges convectifs	(44) et (45)
III.8 Mouvements de l'air	(45)
III.9 Aération	(46) et (47)
III.10 Hétérogénéité climatique	(47)
III.11 Les matériaux de couverture	(47)
III.11.1 Le Verre	(47)
III.11.2 Les matériaux plastiques	(48)
III.12 Conclusion	(49)

Chapitre IV : différents systèmes de chauffage des serres agricole calcul et dimensionnement

Chapitre IV : différents systèmes de chauffage des serres agricole calcul et dimensionnement

IV.1 Introduction	(50)
IV.2 Bilan thermique de la serre	(50)
IV.2.1 Modélisation mathématique	(50)
IV.2.2 Hypothèses simplificatrices	(51)
IV.2.3 Bilan d'énergie de la serre	(51)
IV.2.4 Bilan d'énergie au niveau de la couverture	(51)
IV.2.4.1 L'échange radiatif	(51) et (52)
IV.2.4.2 Les échanges convectifs	(52) et (53)
IV.2.5 Bilan d'énergie au niveau de l'air intérieur	(54)
IV.2.5.1 Les échanges convectifs	(54)
IV.2.5.2 Les échanges par renouvellement d'air	(54)
IV.2.6 Bilan d'énergie au niveau du sol intérieur	(55)
IV.2.7 Déterminations des factures des formes	(56)
IV.2.8 Détermination de la température du ciel	(57)
IV.2.9 Détermination des coefficients d'échanges	(57)
IV.2.9.1 Coefficient d'échanges convectifs	(57) et (58)
IV.2.9.2 Coefficient d'échanges radiatifs	(58)
IV.2.9.3 Coefficient d'échanges conductifs	(59)
IV.2.10 Système d'équation différentielle	(59)
IV.3 Besoin en énergie d'une serre	(60)

IV.4 Dimensionnement de L'échangeur	(60) et (61) et (62)
IV.5 Dispositif expérimental	(63)
IV.6 Chauffage de la serre et mesures effectuées	(63)
IV.7 Résultats expérimentaux	(64) et (65) et (66)
IV.8 Mise en équations du bilan énergétique	(66)
IV.8.1 Bilan d'énergie au niveau de la couverture d'indice i	(67)
IV.8.2 Bilan thermique de l'air intérieur	(67)
IV.8.2.1 Bilan de chaleur sensible	(67)
IV.8.2.2 Bilan des puissances de chaleur latente	(67)
IV.8.2.3 Bilan des puissances au niveau du sol intérieur de la serre	(67)
IV.9 CONCLUSIONS	(68)
Conclusion Générale	(69)

Introduction Générale

Introduction Générale

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de vie humaine.

Le Soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables : son rayonnement est le vecteur de transport de l'énergie utilisable (directement ou indirectement) lors de la photosynthèse, ou lors du cycle de l'eau (qui permet l'hydroélectricité) et l'énergie des vagues (énergie holométrique), la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans (énergie thermique des mers) ou encore la diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau de mer (énergie osmotique). Cette énergie solaire alliée à la rotation de la Terre est à l'origine des vents (énergie éolienne) et des courants marins (énergie hydrolienne). La chaleur interne de la Terre (géothermie) est assimilée à une forme d'énergie renouvelable, et le système Terre-Lune engendre les marées des océans et des mers permettant la mise en valeur de l'énergie marémotrice.

La géothermie est une source d'énergie qualifiée de nouvelle, douce et renouvelable ; elle est utilisée dans plusieurs pays, notamment dans l'agriculture pour le chauffage de serres agricoles.

En Algérie, les puits d'eau chaude, utilisés depuis plusieurs décennies pour la consommation quotidienne et pour l'irrigation, ne furent exploités pour le chauffage des serres agricoles qu'à partir des années 70 et c'était une contribution assez modeste de l'énergie géothermale dans le développement du secteur agricole. Le chauffage des serres a connu ses débuts d'application en 1950 en Hollande, en Belgique, notamment dans les cultures ornementales. Dans les années 1960, le coût de la thermie était tel que dans les installations réalisées, on cherchait à réduire le coût d'investissement sans se soucier du coût de fonctionnement auxquels conduisait le système de chauffage et de climatisation. Toutefois, des améliorations immédiates et faciles à réaliser de l'équipement des serres ont été rationalisées, comme le réglage des brûleurs des chaudières, l'amélioration de l'étanchéité et l'isolation des tuyaux d'amenée. Ces actions se sont vite révélées insuffisantes et leur effet était vite résorbé par l'augmentation successive du prix de l'énergie conventionnelle. Il était nécessaire de considérer le problème sous plusieurs angles : amélioration des techniques de chauffage et d'isolation thermique en tenant compte d'un microclimat lumineux et

Introduction Générale

thermiquement favorable au bon développement des cultures, utiliser d'autres sources que l'énergie fossile et faire en sorte que la serre joue réellement un rôle de captation et de stockage de l'énergie solaire, adaptation des techniques culturales au nouveau système, à partir d'une approche rationnelle des problèmes posés, développement et création des variétés adaptées aux particularités de ce microclimat (lumière, hygrométrie). Un important effort de recherche fondamentale et appliquée était donc nécessaire sur les plans surtout thermique et micro climatique et comme sur les plans biologique et agronomique, des analyses de type économique devaient en être tirées de manière à déterminer les solutions et les techniques les plus rationnelles pour le maraîcher ou l'agriculteur au niveau de la rentabilité et de l'exploitation.

Ce travail rentre dans le cadre de l'élaboration d'un mémoire de fin d'études. Il a pour objectif l'étude de faisabilité d'une installation de chauffage, en utilisant de l'eau géothermale.

Le travail que nous présentons ci-après consiste à :

- ✚ Le premier chapitre est consacré aux différents types des énergies renouvelables.
- ✚ Le deuxième chapitre est consacré à l'énergie géothermale.
- ✚ Le troisième chapitre est consacré aux serres agricoles.
- ✚ Le quatrième chapitre est consacré aux différents systèmes de chauffage de serre agricoles le (calcul et dimensionnement).

Chapitre I : Energie renouvelables

I.1 Introduction

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (photo voltaïque), le vent (éolien), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

I.2 Définition des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables (ER) utilisent des flux inépuisables d'énergies d'origine naturelle (soleil, vent, eau, croissance végétale...). Ces énergies de l'avenir ne couvrent pourtant que 22% de la consommation mondiale d'électricité avec l'importance de l'hydroélectricité qui représente les trois quarts de l'électricité issue des ER. Les principaux intérêts des énergies renouvelables sont leur non épuisement et leurs 'émissions très limitées de gaz à effet de serre (GES) comme en témoigne l'analyse du cycle de vie de leur exploitation. Évaluation des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie pour les grandes catégories de technologies de production d'électricité par :

- ✓ Solaire (thermique et photo voltaïque)
- ✓ Eolienne (Vent).
- ✓ Hydraulique (Eau: turbines).
- ✓ Biomasse (bois CO₂ de combustion = CO₂ de la croissance des arbres : photosynthèse).
- ✓ Énergies géothermique.

I.3 Les énergies renouvelables

I.3.1 L'énergie solaire

L'**énergie solaire** est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du Soleil, traversant l'atmosphère qui en absorbe une partie, et parvenant à la surface de la Terre.

Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse réalisée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires. Le Soleil est à

L'origine de la plupart des énergies sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire et de la géothermie profonde [1].

Les sources d'énergie issues indirectement de l'énergie solaire sont notamment : l'énergie hydraulique, dérivée de l'énergie cinétique de l'eau dont le cycle dépend du Soleil ; l'énergie éolienne, provenant de l'énergie cinétique du vent lié à l'échauffement et à l'évaporation de l'eau, générés par le Soleil, la rotation de la Terre et l'effet Coriolis ; l'énergie hydrolienne et l'énergie des vagues, liées aux mouvements des océans et des cours d'eau ; le bois énergie et l'énergie de la biomasse ainsi que la géothermie de très basse température, provenant des couches superficielles du sol réchauffées par le Soleil. On peut ajouter les énergies fossiles, provenant de matières organiques créées par photosynthèse (charbon, pétrole, gaz naturel...)[2] auxquelles s'ajoute l'énergie biochimique de la matière organique vivante.

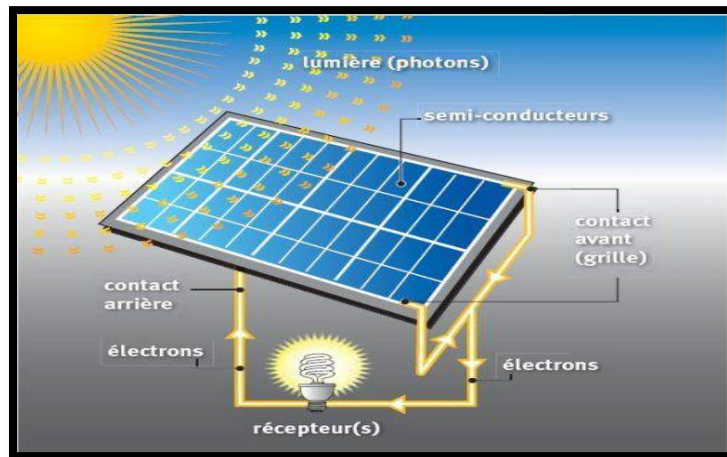


Figure I.1: l'Énergie solaire

I.3.1.1 Ressources solaires

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du Soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'Univers essentiellement sous la forme d'un rayonnement électromagnétique dont la lumière n'est que la partie visible.

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

- l'énergie électromagnétique (lumière visible, infrarouge, ultraviolet et autres rayonnements) émise par le Soleil et arrivant sur Terre (avec des fluctuations décennales, saisonnières et ponctuelles) ;
- la nébulosité (nuages, brouillards, etc.), qui varie considérablement d'un endroit du globe à un autre. Celle-ci est forte à très forte dans les régions océaniques tempérées et subpolaires ainsi que dans les régions équatoriales, alors qu'elle est faible à très faible en période anticyclonique et dans les régions arides subtropicales ou polaires ;
- la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du Soleil et donc l'énergie reçue au sol par unité de surface, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat local.

I.3.1.2 Techniques d'utilisation de l'énergie solaire

Les techniques pour capter directement une partie de cette énergie peuvent être classées entre solaire passif, solaire photovoltaïque et solaire thermique.

I.3.1.2.1 Solaire passif

La plus ancienne et certainement la plus importante, quoique discrète, utilisation de l'énergie solaire consiste à bénéficier de l'apport direct du rayonnement solaire, c'est-à-dire l'énergie solaire passive. Pour qu'un bâtiment bénéficie au mieux des rayons du Soleil, on doit tenir compte de l'énergie solaire lors de la conception architecturale (façades doubles, surface vitrée orientée vers le Sud, isolation thermique, etc.).

L'apport solaire passif représente alors une part importante du chauffage et de l'éclairage du bâtiment et les économies d'énergies peuvent être importantes.

L'habitat passif désigne un bâtiment dont les dépenses d'énergie de chauffage sont réduites d'environ 80 % par rapport à une maison neuve construite selon les normes allemandes d'isolation thermique de 1995. L'énergie solaire passive permet donc de chauffer tout ou partie d'un bâtiment pour un coût proportionnel quasi nul, en tirant parti des conditions d'un site et de son environnement, selon les principes de l'architecture bioclimatique.

I.3.1.2.2 Solaire thermique

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur issue du rayonnement solaire. Ce rayonnement se décline de différentes façons :

- en usage direct de la chaleur : chauffe-eau, chauffage solaire dont fours solaires, cuisinières et sécheuses solaires, par exemple ;
- En usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage : rafraîchissement solaire, centrales solaires thermodynamiques, etc.

I.3.1.2.3 Solaire thermodynamique

La solaire thermodynamique est une technique solaire qui consiste à concentrer l'énergie solaire (via des héliostats, miroirs, etc.) pour produire :

- de l'électricité, sur le même principe qu'une centrale électrique classique (production de vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée) ;
- Un travail mécanique, en transformant un liquide en gaz [1] ou en échauffant directement une partie du moteur, comme dans le moteur Stirling.

I.3.1.2.1 Solaire photovoltaïque

Le terme photovoltaïque peut désigner le phénomène physique d'effet photovoltaïque ou la technique associée. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire par une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles dans un module photovoltaïque, puis les modules sont regroupés pour former des panneaux solaires, installés chez un particulier ou dans une centrale solaire photovoltaïque. Après transformation en courant alternatif grâce à un onduleur, l'installation solaire peut satisfaire un besoin local (en association avec un moyen de stockage) ou être injectée dans un réseau de distribution électrique (le stockage n'étant alors pas nécessaire).

À l'échelle des villes, des cadastres solaires, établis à l'aide de modèles 3D, permettent d'optimiser le positionnement des panneaux solaires.

I.3.2 Énergie éolienne

L'**énergie éolienne** est l'énergie du vent, dont la force motrice (énergie cinétique) est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur, comme une éolienne ou un moulin à vent, en une énergie diversement utilisable.

L'énergie éolienne est une source d'énergie intermittente qui n'est pas produite à la demande, mais selon les conditions météorologiques ; elle nécessite donc des installations de stockage ou de production de remplacement pendant ses périodes d'indisponibilité. La production électrique éolienne peut être prévue avec une assez bonne précision. Sa part dans la production mondiale d'électricité atteignait 4,4 % en 2017 et était estimée à 4,7 % en 2018. Les principaux pays producteurs sont la Chine (31 % du total mondial en 2018), les États-Unis (23 %) et l'Allemagne (9%).

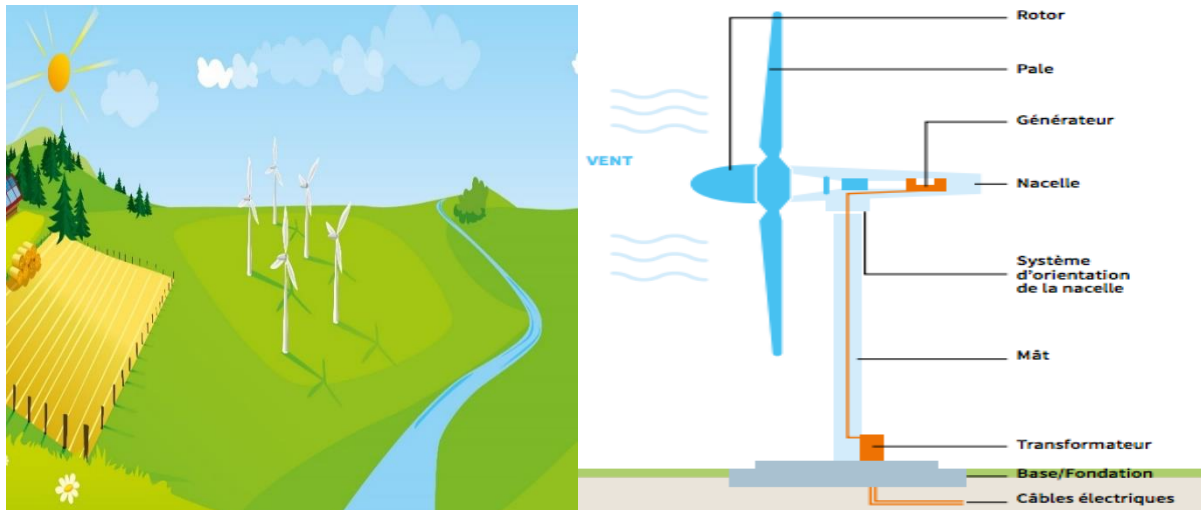


Figure I.2: L'énergie éolienne

Figure I.3: composition d'une éolienne

I.3.2.1 Différentes utilisations

I.3.2.1.1 L'énergie éolienne est utilisée de trois manières

- avec conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;

- Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...) : pompage de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ;
- production d'énergie électrique : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage de l'énergie.

I.3.2.1.2 Rendement des éoliennes

Les éoliennes sont caractérisées par leur rendement en fonction de la vitesse du vent. Les éoliennes actuelles présentent une courbe plafonnée et limitée à des vents de moins de 90 km/h.

I.3.2.1.3 Transformation et stockage de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est par essence une énergie intermittente. Elle n'est prévisible que dans la limite des prévisions météorologiques et ne peut être stockée sous sa forme primaire.

Les partisans des énergies renouvelables voient dans le mix énergétique, combinant éolien, solaire et géothermie, dans le stockage de l'énergie et les économies d'énergie, des solutions pour pallier les problèmes d'intermittence de l'éolien.

L'université de Kassel a créé une centrale virtuelle d'électricité 100 % renouvelable. Elle combine les deux énergies intermittentes éolienne et solaire, ainsi que deux énergies non-intermittentes, l'énergie hydroélectrique et le biogaz, permettant de stocker de l'énergie en cas de surplus, de prendre le relais en l'absence de vent ou de soleil et de réaliser l'appoint [3].

Combiner plusieurs sources renouvelables d'électricité (éolien, photovoltaïque, marémotrice, et hydroélectricité) via un « réseau intelligent » (smart grid) pourrait atténuer les problèmes posés par l'intermittence de chaque source prise individuellement

I.3.2.1.4 Stockage par hydrogène

L'Allemagne, dont la sortie du nucléaire est programmée pour 2022, doit relever le défi de la transition énergétique en faveur des énergies renouvelables. Les difficultés à stocker cette énergie à grande échelle et de manière connectée au réseau conduit parfois à une non exploitation du plein potentiel de cette ressource. L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique est une des pistes les plus sérieusement envisagées. L'électrolyse est un procédé connu et maîtrisé qui permet d'utiliser le surplus d'énergie pour produire de l'hydrogène. La pile à combustible est une des pistes de recherche, comme l'atteste le projet Myrte, plateforme de recherche et développement qui a pour objectif de stocker l'énergie solaire sous forme d'hydrogène, inauguré au début de l'année 2012 en Corse. On peut également citer le projet de recherche européen INGRID lancé en juillet 2012, qui explore la piste du stockage de l'hydrogène sous forme solide grâce à un alliage d'hydrure de magnésium.

I.3.2.1.5 Stockage par batteries

La solution du stockage de l'énergie électrique dans des batteries n'est envisagée que pour des sites isolés et des productions de faible importance. Ce type de stockage est limité par l'investissement représenté par des batteries de grande capacité et par la pollution engendrée par leur recyclage.

I.3.2.1.6 Stockage hydraulique

Une méthode utilisée pour exploiter et stocker les productions excédentaires des éoliennes consiste à les coupler avec des techniques de pompage-turbinage au sein de centrales hydro-éoliennes. Cette technique est à la fois la plus simple et la plus prometteuse après le simple couplage à un potentiel hydraulique supérieur ou égal au potentiel éolien, comme c'est le cas dans le partenariat Danemark-Norvège

I.3.2.1.7 Stockage par transformation

Aux États-Unis, une entreprise conçoit de nouvelles éoliennes qui produisent de l'air comprimé au lieu de l'électricité. Dans la nacelle des éoliennes, au lieu d'un alternateur se trouve

Donc un compresseur d'air. L'air comprimé est stocké et permet de faire tourner un alternateur aux moments où les besoins se font le plus sentir.

Du point de vue du stockage de l'énergie, cette façon de faire impose une conversion d'énergie (de l'air comprimé vers l'électricité, avec un rendement réduit), mais permet de positionner la production électrique lors des pics de consommation où l'électricité est payée plus cher, avec une conversion de moins que par le processus classique (électricité vers stockage puis stockage vers électricité). Certains pensent même que l'on pourrait utiliser directement l'air comprimé ainsi produit pour alimenter des voitures automobiles propulsées avec ce fluide.

En 2009, les Néerlandais de Dutch Rain maker ont réalisé une éolienne dont l'énergie est utilisée pour condenser la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant. Le premier prototype a ainsi condensé 500 litres d'eau douce en 24 h.

En 2010, l'institut allemand Fraunhofer explique dans un communiqué avoir réussi à mettre au point un processus de production de méthane à partir de la production en excès des éoliennes. L'électricité est utilisée pour faire une électrolyse d'eau, produisant de l'oxygène (rejeté) et de l'hydrogène. Cet hydrogène est recombiné à du CO₂ pour produire du méthane, qui est réintroduit dans le circuit de distribution public de gaz naturel.

Près de Hambourg, Siemens Ganesa Reniable Energie (SGRE) construit le démonstrateur d'une unité de stockage d'électricité produite par une éolienne ou prise sur le réseau électrique quand la demande est faible : cette électricité, transformée en chaleur, est stockée dans une roche volcanique recouverte de matière isolante ; lorsque le réseau nécessite à nouveau de l'électricité, la chaleur est extraite de la roche et produit de la vapeur qui passe dans une turbine pour produire de l'électricité. Le démonstrateur, d'une capacité de 30 MWh, doit entrer en service en 2019 et est soutenu par le gouvernement allemand.

I.3.3 L'énergie hydraulique

L'**énergie hydraulique** est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chutes d'eau, cours d'eau, courants marins, marées, vagues[4]. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique liée au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées, les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages.

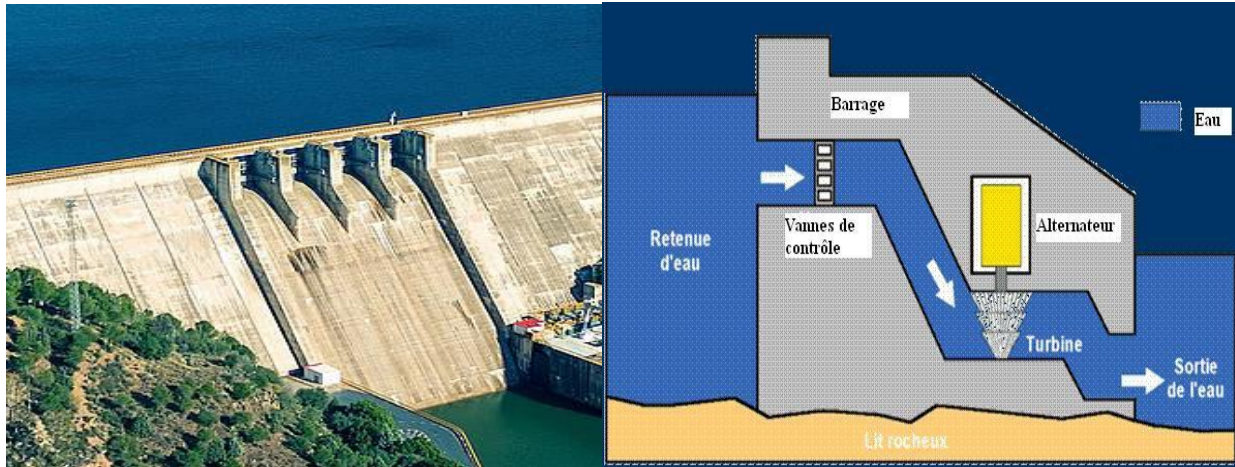


Figure I.4: L'énergie hydraulique

I.3.3.1 Origine

L'énergie hydraulique est une manifestation indirecte de l'énergie du Soleil et de la force de gravité de la lune, comme beaucoup de sources d'énergies renouvelables sur terre (énergie éolienne, énergie des vagues, la biomasse, etc.)[5]. Sous l'action du Soleil et du vent, l'eau s'évapore des océans et forme les nuages qui se déplacent au gré des vents. Des abaissements de température au-dessus des continents[5] provoquent la condensation de la vapeur d'eau. La pluie et la neige (les précipitations) alimentent ainsi les couches poreuses de la Terre, les glaciers, les lacs et l'eau des rivières qui s'écoulent petit à petit dans les océans, c'est le cycle de l'eau. La gravité de la Lune et celle du Soleil produisent les marées dont on peut exploiter l'énergie.

I.3.3.2 Différentes utilisations

✓ Utilisation directe

L'énergie hydraulique peut être convertie directement en énergie mécanique, par exemple en utilisant la force de l'eau d'un ruisseau pour faire tourner la roue d'un moulin à eau ou d'une noria mais aussi pour fabriquer de la pâte à papier.

✓ Utilisation indirecte

L'énergie hydraulique peut aussi être convertie en une autre énergie (historiquement mécanique mais depuis le début du XX siècle plutôt électrique) :

- Une centrale hydroélectrique utilise l'énergie de la hauteur de chute.
- Une centrale au fil de l'eau utilise l'énergie d'un cours d'eau.
- Une centrale marémotrice utilise l'énergie des marées ;
- Une hydrolienne utilise celle des courants marins ;
- L'énergie des vagues peut aussi être exploitée.

I.3.4 Energie de la biomasse

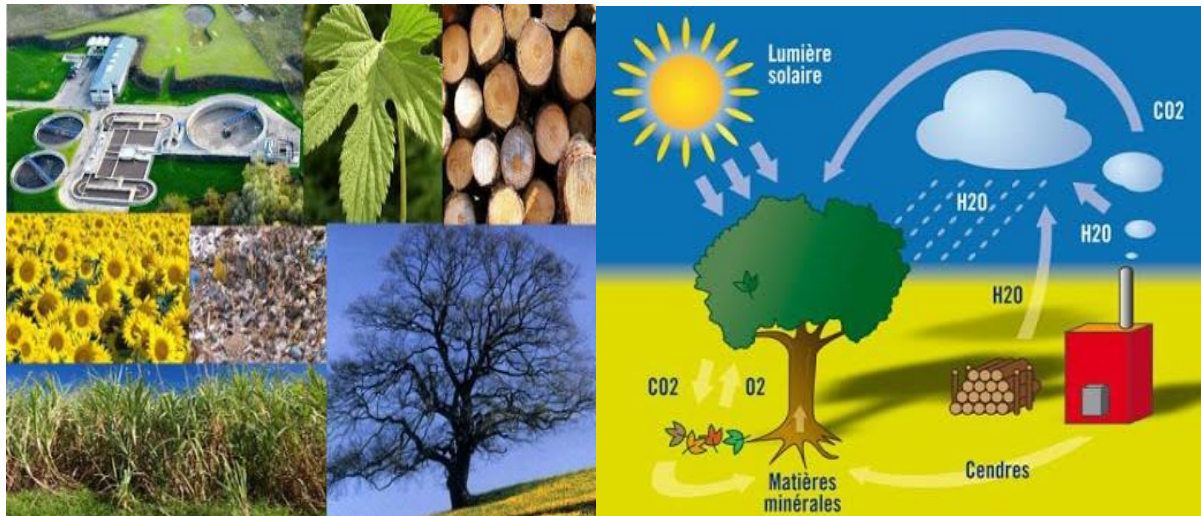


Figure I.5: Energie de la biomasse

Dans le domaine de l'énergie, le terme de biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie. Comprend trois familles principales :

- ✓ Le bio gaz ou La méthanisation.
- ✓ Les bios énergies ou biomasse solide.
- ✓ Les granules de bois le combustible au rendement le plus élevé de la gamme (Viessmann).

Le bois peut être considéré comme une énergie renouvelable tant que le volume prélevé ne dépasse pas l'accroissement naturel de la forêt 1 mètre cube, pour un contenu énergétique de 1500 à 2000kWh

1.3.4.1 Énergie du biogaz

Le **biogaz** est le gaz produit par la fermentation de matières organiques en l'absence d'oxygène. C'est un gaz combustible composé essentiellement de méthane et de dioxyde de carbone.

Il peut être brûlé sur son lieu de production pour obtenir chaleur et électricité ou purifié. Pour obtenir du bio méthane utilisable comme gaz naturel pour véhicules ou injectable sur le réseau de distribution de gaz naturel.

La méthanisation se produit spontanément dans les marais (gaz des marais), les rizières, les grands réservoirs ou barrages hydroélectriques tropicaux, les décharges contenant des déchets ou matières organiques (animales, végétales, fongiques ou bactériennes). On peut la provoquer artificiellement dans des digesteurs (en particulier pour traiter des boues d'épuration et des déchets organiques industriels ou agricoles).

Taille digesteur	Production biogaz	Production en kWh (*)	Production en kWh /an	Economies EUR/jour (**)	Economies EUR/an
Homebiogas	0,5-1 m3/j	11,2 kwh/j	4 088 kWh/an	1,108	404,3
MethaPro	2 m3/j	22,4 kWh/j	8 176 kWh/an	2,215	808,475
MethaAgro 8	8 m3/j	89,6 kWh/j	32 704 kWh/an	8,86	3 234,43
MethAgro 15	15 m3/j	168kWh/j	61 320 kWh/an	16,615	6 064,55

Tableaux I.1: Matières premières

I.3.4.1.1 Réglementation et historique

La consommation mondiale de biogaz (souvent sous forme de bio méthane) aurait progressé en moyenne de 3,5 % par an de 1965 à 2000, pendant que la demande globale en énergie primaire n'augmentait en moyenne "que" de 2,4 % par an. Il pourrait devenir un combustible non-fossile dominant au XXI^e siècle, comme l'a été le pétrole au siècle précédent et le charbon au XIX^e siècle.

Dans le monde, l'utilisation du biogaz au niveau domestique est très répandue, notamment en Asie.

Au Mali, des projets pilotes ont été menés dans des zones isolées, pour mesurer comment le biogaz pouvait produire de l'énergie à usage domestique dans une optique durable. L'expérience a montré qu'avec la formation d'artisans locaux pouvant prendre en charge la production des équipements nécessaires (gazomètre, digesteur) et la formation des familles à l'entretien des équipements, le biogaz peut être une alternative viable à l'utilisation des combustibles ligneux pour la cuisson des repas et améliorer les conditions de vie par d'autres apports en énergie (réfrigération notamment). La pression sur les ressources ligneuses a diminué et le compost produit a été utilisé pour fertiliser les sols. Un appui financier reste nécessaire pour la mise en place du système (équipements, installation, formation).

Arti, une organisation non gouvernementale en Inde, développe un simple digesteur de 0,5 m³ (surélevé) pour les Tropiques qui utilise les déchets de la cuisine (riches en amidon et sucres) pour produire le biogaz. 1 kg de déchets produit 400 litres de biogaz en 6 à 8 heures, ce qui suffit pour environ 15 à 20 minutes de cuisine.

1.3.4.1.2 Composition

Le biogaz est principalement composé de méthane (50 à 70 %), mais aussi de dioxyde de carbone (CO₂) et de quantités variables de vapeur d'eau et de sulfure d'hydrogène (H₂S), voire d'autres composés ("contaminants"), notamment dans les biogaz de décharges. Parmi les impuretés figurent :

- Des siloxanes ;
- Des organochlorés (dont chlorure de vinyle, dichlorométhane, trichlorométhane et tétrachlorométhane qui sont des substances cancérigènes ;
- Des composés soufrés (mercaptans) ;
- Des composés azotés (NH₃ et NH₂) ;
- De l'hydrogène ;
- divers produits intermédiaires de fermentation (alcools, acides, esters...) ;
- Des métaux et métalloïdes
- Et même quelques microbes anaérobies (éventuellement méthanotrophe).

Sa teneur en ces différents éléments, et donc sa valeur énergétique, dépend de la durée et qualité du processus de fermentation, du type d'installation et beaucoup de la nature de la matière fermentescible utilisée (et en particulier de ses proportions en carbone, hydrogène, oxygène et azote ou contaminants indésirables). Par exemple une matière fermentescible riche en carbone et hydrogène produit un biogaz contenant jusqu'à 90 % de méthane, alors que de la cellulose plus pauvre produira un biogaz à seulement 55 % de méthane (et 45 % de gaz carbonique)

1.3.4.1.3 Rôle dans la transition énergétique

✓ Effet de serre

Le biogaz est constitué essentiellement de méthane (CH_4) dont l'effet de serre est très important. Sa combustion produit du dioxyde de carbone, qui est aussi un gaz à effet de serre, mais dont l'impact est moindre. En effet, un kilogramme de méthane (CH_4) a un Potentiel de Préchauffèrent Global (PRG) sur 100 ans, 23 fois supérieur à un kilogramme de dioxyde de carbone.

Utiliser du biogaz n'accroît pas l'effet de serre si le carbone produit (méthane et dioxyde de carbone) a lui-même été absorbé préalablement par les végétaux dont ce biogaz est issu, lors de leur croissance et si cette utilisation s'inscrit dans un cycle court de carbone et si elle ne contribue pas à surexploiter de la biomasse (elle ne fait alors que restituer du carbone qui avait été ôté récemment de l'atmosphère, contrairement au gaz naturel)

✓ Efficacité

Les études de l'IFEU montrent, qu'en Allemagne, l'utilisation de biogaz pour la cogénération locale avec un moteur à gaz est plus efficace vis-à-vis de l'effet serre, de l'injection dans les réseaux et de la maintenance nécessaire. Cependant cette étude évalue l'énergie fournie à l'équivalent de 5 000 litres de fioul par hectare et par an. Remplacer les énergies fossiles et nucléaire par du biogaz nécessiterait à peu près toute la surface de l'Allemagne

1.3.4.2 Les bio carburant



Figure I.6: Energies Les bicarbonates végétales

Un biocarburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques. Les trois principales catégories sont : Huile- végétale -carburant Dès 1891, Rudolph Diesel, convaincu que l'huile végétale est utilisable au même titre que le pétrolée et le charbon. Peut-être mélangé avec le diesel.

1.3.4.3 Bioéthanol

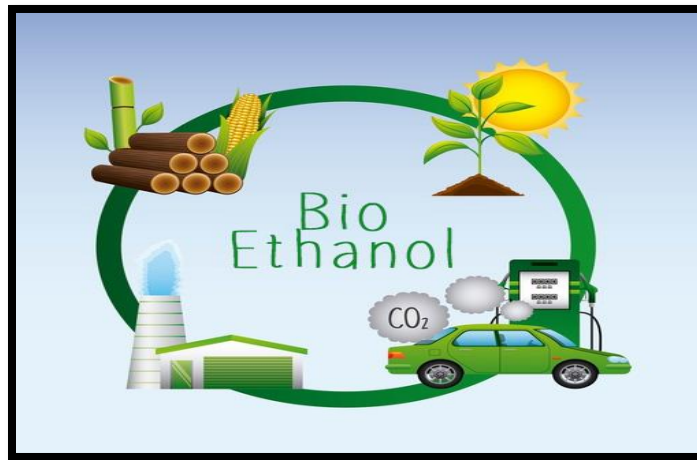


Figure I.7: le bioéthanol

I.3.5 L'énergie géothermique

La **géothermie**, du grec géo (« la Terre ») et thermos (« la chaleur »), 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.

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 chargé 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.



Figure I.8: Energie géothermique

I.3.5.1 Historique

Un des témoignages les plus anciennes dates de 2 000 ans avant Jésus-Christ. Il cite les îles Lipari (Italie) qui exploitaient déjà une eau naturellement chaude pour leurs thermes .

Les techniques modernes de forage ont permis d'atteindre des eaux chaudes jusqu'à 12 262 m de profondeur avec le forage sg3. Ce forage, situé dans les régions froides de la péninsule de Kola (Russie) et dans une zone où le gradient géothermique est faible, a pourtant atteint une eau à plus de 180 °C.

Les Philippines produisent 28 % de leur électricité à partir de la géothermie[6] et l'Islande a atteint la production de 100 % de son électricité par l'hydroélectricité et la géothermie.

En France où la géothermie est depuis longtemps soutenue financièrement par l'AFME puis l'ADEME et géo techniquement par le BRGM (qui a fin 2006 créé en son sein un département spécifiquement consacré à la géothermie, et qui tient à jour avec l'ADEME un site d'information⁴), de nombreux projets ont été mis en œuvre depuis les années 1980, mais surtout En région parisienne, et en

Alsace pour les plus productifs. En 2008, la géothermie assurait environ 0,1 % de la production d'électricité d'origine. Renouvelable en France, en plus des Besoins de chauffage de milliers de foyers Plusieurs zones géographiques.

Seraient potentiellement favorables en France pour la géothermie profonde, les bassins tertiaires ou grabens ayant les mêmes spécificités géologiques que le bassin rhénan. En plus de la plaine d'Alsace, on distingue également la plaine de la Limagne et le couloir rhodanien. Leur rentabilité dépend aussi des prix d'accès aux autres sources d'énergie. L'augmentation de la consommation et du coût des différentes énergies ainsi qu'une certaine volonté d'émettre moins de gaz à effet de serre la rendent plus attrayante. En 2007, en France le BRGM et l'ADEME ont créé un département géothermie pour la promouvoir, après s'être associés à différents programmes de recherche et de travaux de service public. Deux de leurs filiales, CFG Services⁶ (services et ingénierie spécialisée) et Géothermie Bouillante (qui exploite la centrale géothermique de Bouillante en Guadeloupe), sont impliquées dans la géothermie[7]. En 2010, dans les suites du Grenelle de l'environnement de 2007 et d'un Plan de développement des énergies renouvelables visant à préparer la transition énergétique, un groupe de 35 experts a été mis en place regroupés au sein d'un Comité national de la géothermie présidé par Philippe Vesseron (également président d'honneur du BRGM), réuni pour la première fois à Orly en octobre 2010 pour « proposer des actions et des recommandations pour le développement de chacune des formes de la géothermie » (identifiée comme l'une des 18 « filières vertes » à développer), via 3 enjeux (formation, diffusion de l'information et simplification administrative). Un des objectifs du Grenelle est d'utiliser la géothermie pour contribuer à produire 1,3 million de tep/an et participer à une réduction globale de 20 millions de tep/an à horizon 2020 (avec à cette même échéance 20 % de la production électrique des DOM d'origine géothermique). Six cent mille logements pourraient être équipés de 2010 à 2020. En 2015, après un an de consultation des fédérations professionnelles et acteurs du financement, le ministre de l'environnement a présenté un projet d'arrêté ministériel d'application de la loi sur la transition énergétique définissant les niveaux de soutien à l'électricité renouvelable produite par géothermie, visant à dynamiser le développement de la filière afin qu'elle puisse contribuer à l'objectif de 32 % de renouvelables pour la consommation finale d'énergie en 2030, projet qui sera soumis au Conseil supérieur de l'énergie et à la CRE (Commission de régulation de l'énergie) et notifié à la Commission européenne.

I.3.5.2 Principes

Le manteau terrestre étant chaud, la croûte terrestre laisse filtrer un peu de cette chaleur, cependant la plus grande partie de la puissance géothermique obtenue en surface (87 %) est produite par la radioactivité des roches qui constituent la croûte terrestre (désintégration naturelle de l'uranium, du thorium et du potassium)[8].

Il existe dans la croûte terrestre, épaisse en moyenne de 30 km, un gradient de température appelé gradient géothermique qui définit que plus on creuse et plus la température augmente ; en moyenne de 3 K par 100 mètres de profondeur.

La géothermie vise à étudier et exploiter ce phénomène d'augmentation de la température en fonction de la profondeur (même si le flux de puissance obtenu diminue avec la profondeur, puisque l'essentiel de ce flux provient de la radioactivité des roches de la croûte terrestre)¹³

I.3.5.3 Différents types de géothermie

✓ **On distingue habituellement trois types de géothermie**

- La géothermie peu profonde (moins de 1 500 m¹) à basse température ;
- La géothermie profonde à haute température (plus de 150 °C), avec plusieurs approches développées et explorées depuis les années 1970 :
 - Géothermie des roches chaudes sèches (*Hot Dry Rock* ou HDR pour les anglophones), basée sur la fracturation hydraulique et la création d'un « échangeur thermique profond » qu'il faut périodiquement décolmater ;
 - Géothermie des roches naturellement fracturées ou *Hot Fracture Rock* (HFR) ;
 - Géothermie stimulée EGS (*Enhanced Geothermal System*), imaginée aux États-Unis en 1970¹ et mise en œuvre à Soultz-Sous-Forêts en France dans le cadre d'un projet-pilote européen et franco-allemand Géothermie Soultz ;
- La géothermie très profonde à très haute température.

Ces trois types ont en commun de prélever la chaleur contenue dans le sol, issue de la pression, et, dans certains cas, d'une plus ou moins grande proximité du magma.

I.4 Conclusion

Les énergies renouvelables nous proposent de multiples façons de produire de l'énergie. Elles donnent aussi plusieurs :

✓ **Avantage :**

- Plus, les sources sont variées, plus l'indépendance énergétique est assurée ;
- Facilité d'installer, d'utiliser et de combiner plusieurs sources en même temps ;
- Pas d'émission de CO₂ ; Pour la plupart des méthodes.
- Coût au kWh fixe, faible et stable ;
- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.

✓ **Inconvénients :**

- Investissement important ;
- L'installation doit s'intégrer dans l'environnement ;
- Variabilité de la production de l'éolien qui dépend d'un vent aléatoire ;
- Projets de longue durée ;
- Le stockage de l'électricité.

Il ne faut pas oublier qu'il faut commencer par l'optimisation des consommations, ceci se réalise par une conception architecturale bioclimatique accompagnée par des équipements ménagers économes.

Une fois les consommations diminuées (mais pas le confort), nous pouvons en venir à investir dans des systèmes de production d'énergie.

Après avoir donné une définition des différentes énergies renouvelables, le chapitre qui suit exposera l'impact de ces énergies sur le réseau électrique.

Chapitre II : Energie Géothermique

II.1 Introduction

IL s'agit d'exploiter des poches d'eau situées dans les couches profondes du sous-sol, vers 1000 à 2000 mètres de profondeur. L'eau contenue dans ces poches se distingue par des températures de l'ordre de 50 à 70 °C. Cette énergie géothermique est utilisée dans plusieurs pays dans le domaine de l'agriculture pour le chauffage des serres agricoles en vue d'amélioration des cultures sous serre. En Algérie les puits d'eau chaude qui étaient destinés depuis plusieurs décennies pour la consommation quotidienne et pour l'irrigation, ne furent exploités pour le chauffage des serres qu'à partir de l'année 1974 [9]

II.2 Les différents types de la géothermie

L'exploitation de la géothermie dépend du type de gisement et du fluide géothermique existant, ainsi, se distinguent trois types de géothermie :

II.2.1 La géothermie 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. On rencontre cette géothermie haute énergie dans les régions volcaniques (volcans) et Sismiques (frontières de plaques) ou 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.

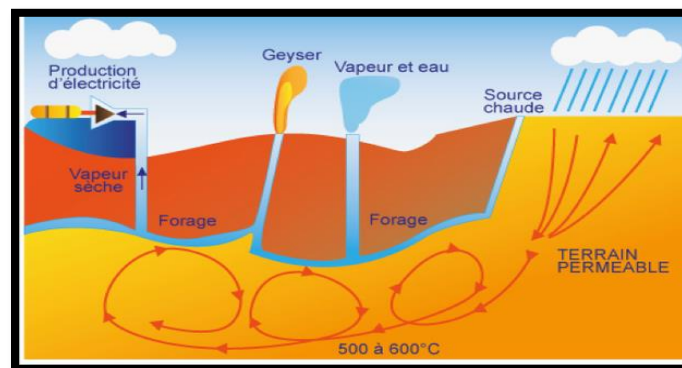


Figure II.1: géothermie haute énergie

II.2.2 La géothermie basse énergie

On parle de « géothermie basse énergie » lorsque le forage permet d'atteindre une température de l'eau entre 30 et 100 °C dans des gisements situés entre 1000 et 3000 m de profondeur (bassin parisien, bassin aquitain...). Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur, et certaines applications industrielles. La géothermie de profondeur (haute et basse énergie), présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie. Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 50 ans en moyenne).

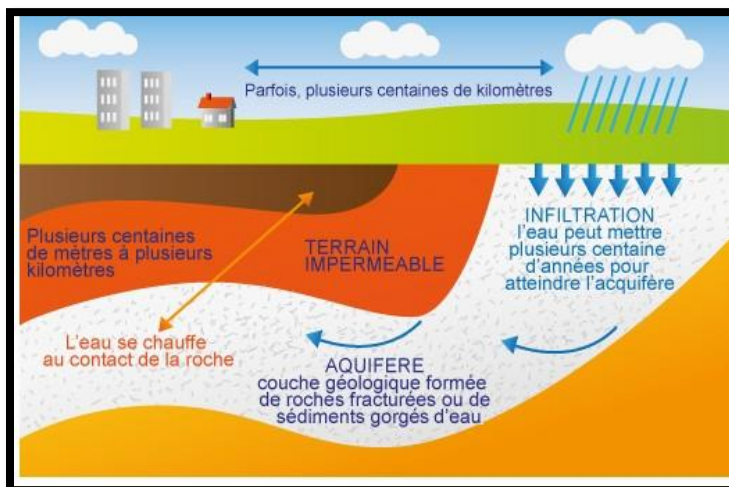


Figure II.2: géothermie basse énergie

II.2.3 La géothermie très basse énergie

La géothermie très basse énergie est une géothermie de faible profondeur dans laquelle la température est comprise entre 10 et 30 °C. Dans ce cas, la chaleur provient non pas des profondeurs de la croûte terrestre, mais du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie, le sol du terrain joint un rôle d'inertie thermique. Cette technologie est appliquée à :

- La climatisation.
- Le chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique.

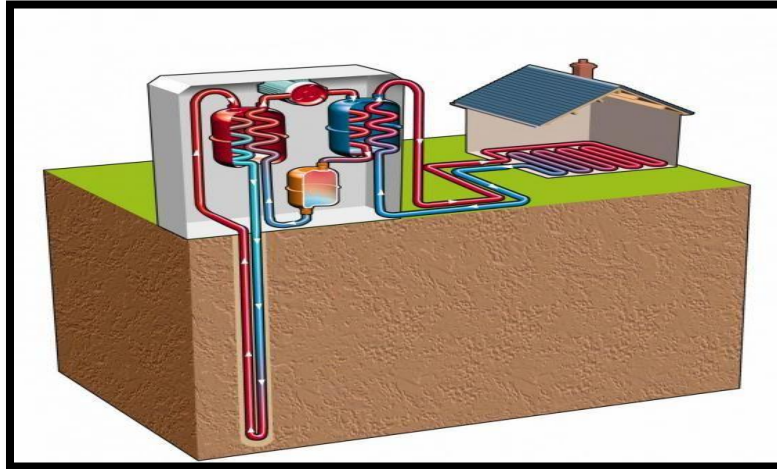


Figure II.2: géothermie très basse énergie

II.2.4 Géothermie roche chaude sèche (HDR)

D'autres techniques en géothermie ont été mises en valeur, c'est la géothermie roche chaude sèche ou Hot Dry Rock ou la géothermie HDR.

La technique consiste d'abord à prospector les sites géothermiques favorables qui sont les sites renfermant des roches sèches en profondeur (moins de 6 km), tels que les granites.

De l'eau froide sous forte pression est injectée par la suite en profondeur dans des puits ou forages d'injection. L'eau élargit les fissures dans les massifs rocheux. Elle acquiert ainsi une forte quantité de chaleur, puis elle remonte en surface par un forage production.

Avant de réinjecter cette eau dans le forage, ses calories sont récupérées et exploitées au niveau d'une centrale géothermique.

Le circuit ainsi formé peut produire une importante quantité d'énergie géothermique. Depuis vingt-cinq ans, plusieurs projets de recherches sont menés dans ce domaine surtout aux Etats-Unis, au Japon et en Europe. Parmi ces projets, celui de l'union européenne, il est destiné à la création d'une centrale géothermique à Soultz-Sous-Forêts (Alsace –France).

Ce pendant d'autres progrès dans l'exploitation restent à accomplir pour maîtriser ce type de gisement qui peut représenter l'essentiel du potentiel géothermique dans le monde compte tenu du fait de la grande répartition de roches chaudes en profondeur.

II.4 Principe d'exploitation de l'énergie géothermique

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Il existe un flux géothermique naturel à la surface du globe, mais il est si faible qu'il ne peut être directement capté. En réalité on exploite la chaleur accumulée, stockée dans certaines parties du sous-sol (nappes d'eau) [10].

II.5 Les différents systèmes de chauffage

Ces systèmes se caractérisent par l'importance relative des apports par rayonnement et par convection ; on peut donc les classer en deux groupes : le chauffage de type radiatif, et le chauffage de type convectif.

II.5.1 Le chauffage de type radiatif

Ces systèmes sont d'autant plus efficaces que la surface émissive est plus chaude permettant ainsi d'apporter des calories à la partie aérienne de la plante par convection et rayonnement et à la partie souterraine par conduction dans le sol. On distingue :

II.5.1.1 Paillage radiant

Le paillage radiant est un chauffage à la fois de l'air et du sol constitué par des gaines plastiques posées au sol où circule de l'eau tiède à une température (20 à 30°C) et qui en plus de son rôle radiatif, transmet dans le sol une partie importante de chaleur par conduction.

II.5.1.2 Thermosiphon

Constitué par des tuyauteries dans lesquelles on fait circuler un fluide à température très élevée, généralement de l'eau (90 à 100°C), et depuis peu, de l'eau pressurisée et à des températures de l'ordre de 120°C. La répartition de la chaleur se fait par convection naturelle.

Ce mode de chauffage modifie peu la turbulence. Ce système crée des profils verticaux de température qui sont uniformes et stables dans le temps et dont le développement assez important dans les années quatre-vingt est cependant freiné par son coût d'investissement élevé.

II.5.1.3 Panneaux radiants

Utilisée à des températures très élevées (plusieurs centaines de degrés) mais encore d'un usage relativement limité en serres. Ces systèmes de chauffage permettent d'obtenir une température de végétal supérieure à celle de l'air ambiant ce qui diminue les risques de condensation, source de développement des maladies parasitaires.

II.5.1.4 Les avantages et les inconvénients du chauffage de type radiatif

➤ Les avantages

- ✓ L'obtention de champ de température d'air et de surface très homogène (écart de l'ordre de 1°C) dans toute la serre.
- ✓ La possibilité d'obtenir des températures de surface égales ou supérieures à celles de l'air ambiant, ce qui permet de fixer des températures de consigne d'air plus faible que dans le système convectif.
- ✓ La possibilité de localiser le chauffage et d'apporter des calories à l'endroit voulu.

➤ Les inconvénients

- ✓ Une inertie thermique relativement grande.
- ✓ Une certaine réduction de la luminosité de la serre notamment pour les systèmes localisés sous faitière.
- ✓ Un coût d'investissement assez élevé surtout pour le thermosiphon et le paillage radiant.

II.5.2 Le chauffage de type convectif

Ces systèmes n'agissent pratiquement que par convection : de l'air est chauffé dans un générateur ou échangeur de chaleur puis envoyé dans la serre à vitesse et température plus au moins élevées, l'effet du rayonnement est négligeable.

On distingue :

II.5.2.1 Aérothermes

Ils sont constitués par des échangeurs eau/air ou un courant d'air à grande vitesse extrait les calories des canalisations d'eau chaude ; il existe également des résistances chauffantes. Les

échangeurs sont généralement suspendus à la charpente, il est très utilisé notamment dans les serres florales du midi de la France du fait de son faible coût d'investissement.

II.5.2.2 Générateurs d'air chaud

Où la combustion est réalisée directement sur place, mais où il faut éliminer de la serre les gaz de combustion par l'intermédiaire d'une cheminée. Ces systèmes se caractérisent par une température de végétal inférieure à celle de l'air, une inertie très faible et surtout un champ de température beaucoup plus hétérogène que dans le cas des systèmes radiatifs, sauf si on répartit l'air chaud à l'aide de tube de distribution translucide.

II.5.2.3 Les avantages et inconvénients de chauffage de type convectif

➤ Les avantages

- ✓ Une mise en œuvre facile est une grande souplesse d'utilisation due au temps de réponse immédiat du système.
- ✓ Un coût d'investissement modéré.

➤ Les inconvénients

- ✓ Une grande hétérogénéité des champs thermiques dans la serre.
- ✓ Les températures de végétal plus que la température consignée.
- ✓ Les pertes plus importantes par fuites du fait du brassage important de l'air.

II.6 La géothermie dans le Monde

Source	Capacité installée		Production par an	
	MWe	%	GWh/an	%
Géothermie	7049	52	42053	79,6
Energie éolienne	6050	44,7	9933	18,6
Energie solaire	175	1,3	229	0,4
Energie des vagues	264	2,0	602	1,2

Tableau II.1: Production électrique par les énergies renouvelables

II.7 La géothermie en Algérie

II.7.1 L'exploration

En Algérie la recherche géothermique entre dans le cadre des activités du Centre de Développement des Energies Renouvelables C.D.E.R. de Bouzaréah et fut aussi l'objet de recherches à la SONATRACH (Direction Recherche et Développement, 1980)

Les études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord algérien ; Ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales. Près de 200 sources ont été inventoriées, elles sont réparties à travers tout le territoire nord algérien, majoritaires au Nord-Est, Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskoutine (98°C) à Guelma ; Hammam Boutaleb (52°C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66°C) à Mascara. Ces nombreuses sources thermales émergent principalement à partir des calcaires jurassiques du Nord de l'Algérie. Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence ; au Nord-Ouest, au Nord- Est et au Centre-Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les régions d'Oran, de la Kabylie et de Constantine.

En plus des nombreuses sources thermales dans le Nord du pays, il existe dans le Sud algérien et plus exactement dans le Sahara septentrional une importante réserve en eau thermale qui est la nappe du Continental Intercalaire.

Sources thermales	Région	Faciès chimique	Résidus Secs (mg/l)	Température (°C)	Débit (l/s)
H. Chellala	Guelma	Sulfaté magnésien	1600	98	100
H.Bou Hadjar	Ain-Temouchent	Chloruré sodique	3210	66.5	-
H.Bouhanifia	Mascara	Bicarbonaté sodique	1400	66	-

H. Boutaleb	Sétif	Chloruré sodique	3416	52	-
H.Essalihine	Khenchela	Chloruré sodique	2082	70	-
H. Salhine	Skikda	Sulfaté magnésien	2046	55	-
H.Sidi Bou Abdellah	Relizane	Chloruré sodique	1194	51	-
H. Delaa	Msila	Sulfaté sodique	1980	42	-
H. Rabi	Saida	Chloruré sodique	1524	47	-
H. Sillal	Bejaia	Chloruré sodique	2221	46	-
H. Ben Haroun	Constantine	Chloruré sodique	3762	42	10

Tableau II.2: Principales Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie

II.8 Avantages et inconvénients de l'énergie géothermique

L'énergie géothermique est une énergie renouvelable obtenue à partir de la chaleur stockée à l'intérieur de la Terre. Grâce aux lois de la thermodynamique, l'énergie thermique est transférée de l'énergie géothermique repose généralement sur le fait que la température du sous-sol est plus chaude qu'à la surface, en hiver, et plus froide en été.

C'est une conséquence du fait que les couches superficielles de la Terre sont chauffées et refroidies beaucoup plus facilement que l'intérieur, qui est maintenu à une température constante tout au long des saisons.

Cependant, l'utilisation de l'énergie géothermique implique certains avantages et inconvénients que nous analysons ci-dessous.

a. Avantages de l'énergie géothermique

- ✓ En général, les avantages de la géothermie ont supérieurs aux inconvénients. Nous list on ci-dessous les principaux avantages de l'énergie géothermique.
- ✓ C'est l'énergie la plus efficace de toutes les énergies renouvelables.
- ✓ La quantité d'énergie thermique perdue en transportant la chaleur du fond du puits à la surface est minimale.
- ✓ L'énergie géothermique reste stable tout au long du différent essai on de l'année. La source de chaleur étant de plusieurs mètres sous terre, l'inertie thermique est très élevée.
- ✓ La terre ci-dessus a une fonction isolante qui empêche les transmissions thermiques.
- ✓ L'effet est similaire à celui d'une grotte où la température est pratiquement constante tout au long de l'année.
- ✓ Un avantage important est la facilité de maintenance.
- ✓ L'énergie géothermique à de hautes performances et une faible consommation.
- ✓ Économies économiques. Par exemple, dans une maison d'environ 150 à 180 mètres carrés, les économies économiques impliquées sont de 70%.
- ✓ Le temps de retour est très bas. Une installation d'énergie géothermique est amortie entre quatre et six ans, ce qui signifie que pendant ce temps, tout l'argent économisé en énergie est égal au prix qu'il a fallu pour installer la technologie.

b. inconvénient de l'énergie géothermique

- ✓ C'est une nouvelle technologie et moins connue que les autres sources d'énergie. Il est également difficile de calculer le nombre de projets.
- ✓ Il est plus difficile à installer en particulier dans les grandes villes. L'inconvénient des villes est que le sous-sol appartient à la mairie et est occupé par d'autres services tels que les canalisations d'égout, le gaz et l'électricité, etc.
- ✓ Utilisation locale seulement. Il ne peut pas être transporté comme source principale de chaleur, il doit être consommé au même endroit d'où il provient. D'un autre côté, dans les centrales géothermiques, ce problème disparaît puisque l'électricité peut être transportée.

- ✓ Emissions toxiques. En cas d'accident ou de fuite, l'hydrogène sulfuré peut être libéré, ce qui est détecté par son odeur d'ou pourris, mais qui n'est pas perçu en grande quantité et est mortel. Dans ces cas, il y aurait aussi un risque que des substances toxiques, telles que l'arsenic, l'ammoniac, etc., soient rejetées et contaminent les eaux avoisinantes.

II.9 Conclusion

D'une manière générale, la géothermie se caractérise par son développement relativement récent et par une technologie largement inspirée au départ de l'expérience pétrolière.

Peut-être moins connue et certainement moins médiatique que d'autres énergies renouvelables comme le solaire, l'éolien ou la biomasse, la géothermie présente pourtant de nombre luxa tous Elle, permet ainsi de couvrir une large gamme d'usages.

À partir de ressources géothermales de haute ou moyenne énergie, il est possible de produire de l'électricité aussi bien pour l'alimentation de réseaux existants que pour l'alimentation de zones isolées et à des coûts très compétitifs tout à fait concurrentiels à ceux obtenus avec des énergies plus classiques. Cette activité est présente dans plus d'une vingtaine de pays aussi bien dans des pays industrialisés que dans des pays en développement. En 2007, la puissance électrique mondiale installée était de l'ordre de 8 900 MW, ce qui plaçait cette filière au quatrième rang des filières d'énergie renouvelable comme source de production d'électricité, derrière l'hydraulique, la biomasse et l'éolien.

La production de chaleur par géothermie, par la valorisation de ressources de basse ou très basse énergie, offre également de multiples possibilités (chauffage/rafraîchissement de bâtiments, chauffage de serre short coles ou maraîchères, de bassins de pisciculture, applications diverses dans l'industrie...). Elle peut être au essias souciée à de la production d'eau potable, à du thermalisme, à des activités de loisirs (thermoludisme), etc., et participer ainsi à la création d'activités économiques locales génératrices d'emploi.

Plus, d'une soixantaine de pays exploitent ce type de ressources. Avec 72,6 TWh produits annuellement, la production de chaleur par géothermie se place au deuxième rang mondial des sources de chaleur renouvelable derrière la biomasse.

D'un point de vue environnemental, la géothermie est probablement d'une des énergies les moins polluantes comme l'attestent différentes études comparatives réalisées sur l'ensemble des filières énergétiques. À titre d'exemple, la géothermie en Île-de-France, où fonctionnent plus d'une trentaine de réseaux de chaleur géothermiques, contribue pour 0,8 % à la réduction de la pollution atmosphérique...

Chapitre III: different type serres agricole

III.1 introduction

La serre est une structure qui peut être parfaitement close destinée en général à la production agricole, elle vise à protéger les cultures vivrières (légumes et fruits) ou de loisir (fleurs) des conditions climatiques rudes. Il s'agit d'apporter une meilleure gestion des besoins des plantes et accélérer ainsi leurs croissances ce qui permettra d'assurer une production indépendante le long de l'année. En chine, l'apparition de la serre solaire en plastique SPG (solaire plastic green house) également appelée maison de soleil ou serre solaire, présente un point de repère et une révolution dans l'horticulture chinoise. La SPG se distingue des autres types de serres par la dépendance totale à l'énergie solaire. Aujourd'hui, les SPG sont Largement utilisées en chine pour produire divers légumes, fleurs et fruits en saison froide. [11]

III.2 La définition d'une serre agricole

Une serre est une structure qui peut être parfaitement close destinée en général à la production agricole. Elle vise à soustraire aux éléments climatiques les cultures vivrières ou de loisir pour une meilleure gestion des besoins des plantes et pour en accélérer la croissance ou les produire indépendamment des saisons. La serre, conçue à l'origine comme une simple enceinte limitée par une paroi transparente, est en- elle-même un agent de modification du climat le climat spontané s'établit " sous abri" ne répond qu'exceptionnellement à la totalité des exigence des cultures, il permet, certes, de se soustraire partiellement au interdiction culturelles du climat extérieur, en particulier à celles liées aux basses température, et d'éliminer les contraintes imposées par les épisodes pluvieux ou la violence de vent. La serre est une " enceinte" destinée à la culture ou à la protection des plantes en exploitant le rayonnement solaire les dimensions de cette enceinte permettent à un homme de travailler aisément à l'intérieur.

III.3 Description d'une serre

III.3.1 Les différents types de la serre

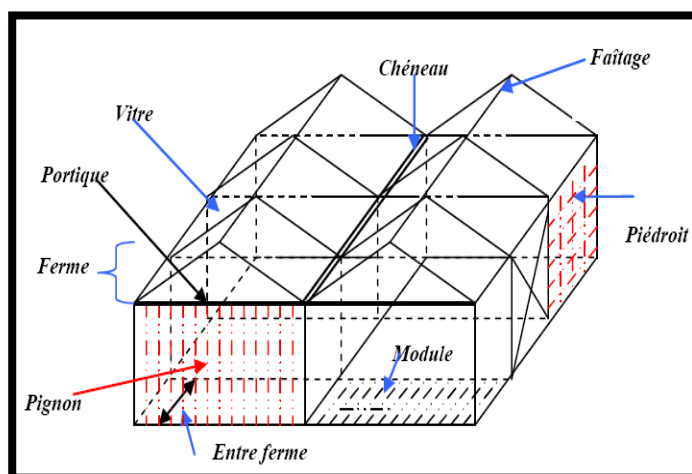
La classification des serres est très complexe est plus difficile, et de classer les serres de différentes façons : classification technologique, et professionnelle :

III.3.2 La serre chapelle

La chapelle est l'unité de construction de la serre formée par deux parois latérales verticales (ou très légèrement penchées) et un toit à deux pentes, généralement symétriques, La chapelle est caractérisée par sa largeur, les dimensions courantes sont approximativement entre (3, 6, 9,12 et 16m). [12]



FigureIII.1 : serre chapelle



FigureIII.2 : Structure d'une Serre d'horticulture constituée de deux chapelles et de trois module

III.3.3 La serre tunnel

En général, la serre tunnel se compose d'une série d'éléments juxtaposés constitués chacun par une armature en tube d'acier et en profilés assemblés par des boulons. La largeur est de (3 à 9) m. Le film plastique se fixe par divers systèmes de clips qui coincent le film contre le profil ou entre deux baguettes tout au long de la serre. La serre tunnel classique est arrondie, mais il existe également des modèles à pieds droits comme pour les serres en verre, Certaines d'entre elles sont d'ailleurs convertibles pour leurs couvertures [12].



Figure III.3 : la serre Tunnel



Figure III.4 : la serre petit Tunnel

III.3.4 La serre gonflable

Est une serre dont les parois sont flexibles de la manière où leur volume varie avec l'état de leur climat "la température élevée provoque donc une détente qui fait augmenter la pression totale intérieure. la condensation de la vapeur d'eau diminue aussi la pression totale, et provoque une dépression par conséquent la paroi se rabat sur l'armature de la serre. Il existe d'autres types de serre utilisés dans des applications particulières comme la serre adossée et la serre roulante.



Figure III.5 : La serre gonflable

III.3.5 la serre de multiplication

C'est une serre donc de production rapide de plantules de semence. Elle est étroite et longue, bien isolée de façon à pouvoir maintenir des températures élevées. La hauteur est basse et les largeurs de chapelles sont de l'ordre de 3 mètres [12].



Figure III.6 : la serre de multiplication

III.4 Caractéristiques des serres

III.4.1 Le climat dans la serre

Le climat spontané à l'intérieur de la serre dépend essentiellement du climat extérieur, des caractéristiques physiques de l'air intérieur, de la forme de la serre, du volume de l'abri, son orientation et des qualités physico-chimiques des matériaux de la couverture utilisée. Les principaux facteurs du milieu interne d'une serre, qui sont modifiés par rapport à l'extérieure sont : la lumière, la température, l'humidité et les concentrations des gaz (CO₂, O₂)

III.4.2 La lumière

Les conditions d'éclairement à l'intérieur de la serre sont sous l'étroite dépendance du climat lumineux naturel, la meilleure utilisation de ce climat naturel sera liée au choix des matériaux de couverture (verre, pvc, polyéthylène) et aux conditions de leur mise en œuvre (structure, forme et orientation des serres) qui ont une grande influence sur l'utilisation raisonnable de ce climat lumineux naturel. [13]

III.4.3 Température

La température de l'air, prise comme caractéristique du climat de la serre, est la résultante du bilan d'énergie établi sous la serre. L'effet de serre se présente généralement de la façon suivante : Pendant la nuit la déperdition d'énergie par rayonnement infrarouge limite l'atténuation de refroidissement nocturne, dans le cas des nuits particulières et en absence de turbulences à l'intérieur de la serre ce phénomène peut entraîner des abaissements de température plus marqués, on parle alors d'inversement de température L'élévation de température de l'air pendant le jour qui devient rapidement excessive lorsque le rayonnement solaire est intense, est dû aux effets conjugués des piégeages des apports radiatifs solaires et à la réduction d'échanges convectifs. Il est alors nécessaire d'intervenir en augmentant la vitesse de renouvellement de l'air par aération statique ou par ventilation dynamique. [14]

III.4.4 l'humidité

L'accroissement de la température de l'air dans la serre tend à créer un déficit de saturation et donc une diminution d'humidité, alors que le confinement et l'étanchéité de la serre la favorisent. Les conséquences de l'humidité sont :

•**Pendant le jour** : L'élévation de la température de l'air peut entraîner un abaissement exagéré de son humidité relative et provoquer un véritable "stress hydrique" au niveau de la végétation d'où la nécessité de prévoir un système de ventilation de la serre. [14]

•**Pendant la nuit** : Les serres étant généralement fermées, l'humidité relative est élevée. Au cours de la nuit, la température baisse. Il se produit fréquemment des condensations sur les parois et les gouttes condensées peuvent tomber sur la végétation (Conditions favorables au développement de certaines maladies...).

III.4.5 Teneur en gaz carbonique

Dans le cas des serres très étanches (peu aérées), il est souhaitable de réaliser un enrichissement en CO₂ d'une façon judicieuse pour qu'il soit bénéfique, aussi bien pour le rendement que pour la photosynthèse. Dans les régions arides, où le besoin de refroidissement est important dès le début de la saison de culture, la ventilation est alors abondante pendant la majeure partie de la journée, l'enrichissement en CO₂ est peu applicable. [14]

III.4.6 l'orientation des serres

Le réglage de l'orientation de la serre selon la course du soleil ainsi que selon la direction des vents a causé des difficultés pour éviter l'hétérogénéité de certaines conditions climatiques à l'intérieure de la serre. En chine par exemple l'orientation optimale de la serre, c'est plein sud pour profiter au maximum des rayons du soleil durant toute la journée. La comparaison entre le matin et le soir a montré que cette orientation permet d'avoir une meilleure homogénéité du flux lumineux, elle a l'avantage de réduire les effets néfastes des vents tant sur la structure que sur les déperditions énergétiques de la serre. [13]

III.4.7 l'effet de serre

Dans la serre on peut distinguer deux effets principaux. Le premier permet la réduction d'échange d'air entre l'intérieur et l'extérieur de la serre. Le deuxième organise le passage du rayonnement solaire, c'est à dire, joue le rôle d'un écran peu transparent au rayonnement infrarouge lointain (10à15µm), émis par le sol. La végétation à l'intérieur de la serrées ainsi exposée au rayonnement solaire visible et infrarouge proche (0.6à4µm).

Les deux effets précédents entraînent une élévation très nette de la température pendant la journée. La variation de ces effets s'effectue suivants le taux d'aération appliqué et aussi selon les propriétés de transmission et d'absorption par le matériau de couverture, des rayonnements solaire et terrestre [13]

III.4.8 le vent

Le vent est considéré comme un déplacement d'air s'effectuant surtout horizontalement. Ce déplacement peut être caractérisé par sa vitesse et sa direction. Dans les stations météorologiques, la vitesse et la direction sont mesurées à dix mètres au-dessus du sol. La vitesse diminue lorsque l'on se rapproche du sol et il est possible de calculer sa moyenne à une hauteur h au-dessus du sol en connaissant la vitesse de référence à 10 m (selon la formule d'Hellman).

$$V_h' = V_{10} [0,233 + 0,656 \log (h' + 4,75)]. \text{ (m/s)}$$

Avec :

$$V_h' = \text{vitesse d'altitude } h'$$

$$V_{10} = \text{vitesse d'altitude 10 m}$$

III.5 Les aspects spécifiques à la serre

III.5.1 La photosynthèse

La photosynthèse est un processus de conversion d'énergie radiative en énergie chimique, transportable et réutilisable. Elle repose sur la transformation de l'oxyde de carbone et d'hydrogène à faible énergie chimique potentielle, en hydrates de carbone à énergie potentielle chimique élevée. [14]

III.5.2 La respiration

Les hydrates de carbone formés par la photosynthèse sont distribués dans tout l'organisme et peuvent alors être soit polymérisés en macromolécules destinées à l'élaboration des parois cellulaires, soit mis en réserve sous forme de sucre ou de graisse, soit

Finalemment utilisés comme source d'énergie lors de synthèse d'autres substances organiques.

La récupération de l'énergie chimique emmagasinée dans les hydrates de carbone s'effectue par un processus de dégradation oxydative, dénommé respiration, qui peut être considéré dans une certaine mesure comme la réaction inverse de la photosynthèse. [14]

III.5.3 l'évapotranspiration

Les transferts d'eau du système sol-végétation dans la serre peuvent s'effectuer selon deux canaux. Soit par évaporation directe de l'eau du sol soit par transpiration des végétaux préalablement prélevée dans le sol par leurs systèmes racinaux. L'évaporation directe se produit essentiellement dans une zone de faible épaisseur située immédiatement sous la surface du sol. Les deux processus se produisent simultanément et de telle manière qu'il est difficile de les distinguer. Ils sont englobés sous le terme général d'évapotranspiration. [12]

III.6 les sources et le type d'énergie utilisée dans le chauffage des serres

Les sources d'énergie qualifiées de nouvelles, douces et renouvelables, comprenant essentiellement la géothermie, la pompe à chaleur, l'énergie solaire et l'utilisation des rejets thermiques et industriels, sont utilisées actuellement dans plusieurs domaines notamment dans le développement du secteur agricole.

III.6.1 Géothermie

Il s'agit d'exploiter des poches d'eau situées dans les couches profondes du sous-sol ; vers 1000 à 2000 [m] de profondeur. L'eau contenue dans ces poches se distingue par des températures de l'ordre de 50 à 70 °C. Cette énergie géothermique est utilisée dans plusieurs pays dans le domaine de l'agriculture pour le chauffage des serres agricoles en vue d'amélioration des cultures sous serre. [15]

III.6.2 L'énergie solaire

La serre elle-même est un capteur solaire à la fois biologique (photosynthèse) et thermique. Le capteur thermique est même souvent trop efficace puisqu'il faut fréquemment aérer la serre et donc rejeter la chaleur à l'extérieur par ventilation. Un système de stockage de cette chaleur doit être prévu au vu non seulement des rapports d'ensoleillement jour/nuit mais aussi des rapports hiver/été ce qui représente un obstacle majeur. [15]

III.6.3 Pompe à chaleur

C'est une machine permettant de rehausser le niveau thermique d'une source énergétique ; elle refroidit une source non utilisable ; le condenseur de celle-ci est en contact avec un circuit d'eau permettant de chauffer la serre agricole. La pompe à chaleur nécessite un investissement élevé ; il est nécessaire de la rentabiliser en l'utilisant le plus longtemps possible, ce qui représente un inconvénient dans les périodes de pointe [15].

III.6.4 Le chauffage de sol

Le chauffage du sol peu utilisé en serre : on peut signaler quelque installation où le chauffage est assuré soit par des tuyaux généralement en matière plastique, parcourus par de l'eau entre 30 et 60. Ces systèmes se caractérisent par une grande inertie thermique du fait du stockage de la chaleur par le sol [11].

D'autre part, les températures d'air sont en général faibles par rapport aux températures de sol, ce qui peut entraîner un déséquilibre du régime thermique préjudiciable à la culture. Le chauffage associant tuyaux dans le sol et aérothermes est très intéressant, puisqu'il permet d'obtenir des régimes thermique air- sol équilibrés et d'ajuster les apports thermiques dans l'air et dans le sol de manière favorisée [11].

III.6.5 Les écrans thermiques

Les écrans thermiques sont des toiles tissées de bandes de polyester et de bandes d'aluminium. Cet assemblage des deux matières confère à cette trame les fonctions d'ombrage et d'isolation. La toile est portée sur toute la surface de la serre, l'ouverture et la fermeture étant régulée automatiquement à l'aide de sondes de température. Ces écrans sont d'une grande efficacité pour la régulation de la température dans les serres, été comme hiver. L'été, ils permettent d'atténuer, par ombrage, l'élévation trop rapide de la température lors d'un fort ensoleillement. La nuit et l'hiver, ils permettent de conserver la chaleur à l'intérieur de la serre afin d'éviter une chute brutale des températures. Leur mise en place nécessite cependant une surface libre importante dans la partie supérieure de la serre pour y attacher les armatures et les filins de guidage de la toile. La pose est souvent complexe voire impossible lorsque les serres sont trop anciennes ou mal adaptées. Selon les conditions climatiques,

L'alittérature mentionne des économies d'énergie liées à l'utilisation d'écrans thermiques variant de 20 à 45% et ce sans pénaliser le rendement [16].

III.6.6 Le chauffage localisé

Lorsque les conditions climatiques le permettent, il est possible d'installer un dispositif de chauffage localisé, basse ou haute température. Cette technique permet de diminuer la puissance thermique installée tout en augmentant la précocité et le rendement. Ce procédé consiste à faire circuler de l'eau chaude à température inférieure à 50°C pour la basse température et supérieure à 50°C pour la haute température, dans des tuyaux de plastique souples ou d'acier situés localement près des parties nécessitant les plus de chaleur -racines, fruits... Pour un bon fonctionnement du système, il faut veiller à conserver une température homogène au sein des plantes en alternant les tuyaux d'eau entrante et sortante. Le chauffage localisé réduit les charges liées au chauffage de 20 à 30%. Il est facile d'installation même pour des serres anciennes [7].

III.6.7 Les rejets thermiques industriels

Certains procédés industriels amènent à rejeter dans l'environnement de l'eau plus ou moins tiède, c'est le cas de l'industrie chimique, pétrolière (cracking), des distilleries des centrales électriques [15].

III.6.8 Le stockage de l'excès de chaleur

L'utilisation de l'excès de chaleur produit par l'effet serre pendant le jour, est tout de suite purifié par ventilation on sous sol.la chaleur aussi sera stockée dans des tunnels rempli par de la pierre ayant une capacité de stockage important. Pendant la période nocturne, on restitué l'énergie pris à l'ablement stockée par ventilation on soufflant de l'air frais. La chaleur serait Réparti uniformément dans la serre en redisant ainsi le graduiez de température jour/nuit

III.7 Conditions climatiques d'une serre

III.7.1 Échanges thermiques

Les serres agricoles constituent un système biologique et énergétique complexe dans lequel la plupart des modes de transfert thermiques sont mis en jeu.

Les conditions climatiques au voisinage du sol résultent des échanges de chaleurs et de masse entre le sol, la végétation et l'atmosphère. Ainsi l'agro système serre peut-être décrit à partir des transferts d'énergie et de masse. Ces transferts peuvent s'effectuer sous trois formes différentes par rayonnement, convection et conduction. [15]

➤ **Les échanges radiatifs**

Le rayonnement solaire constitue une source d'énergie naturelle faisant chauffer le système terrestre. La partie qui nous parvient se situe dans une bande spectrale grossièrement comprise entre 0.3 et 2.5 μm de longueur d'onde.

➤ **Les échanges convectifs**

La convection est le mécanisme le plus important dans le transfert de chaleur sous serres. Il est évident que les transferts convectifs dans ce système s'effectuent entre leurs composantes solides (sol, parois) et l'air [15].

➤ **Les échanges conductifs**

Concernent essentiellement les transferts thermiques entre la surface du sol et les déperditions thermiques à travers les parois ou les vitres.

La modélisation et l'établissement du modèle mathématique, traduisant les phénomènes considérés, aboutissent alors à la résolution d'un système d'équations, ici par des méthodes numériques considérées

III.7.2 Échanges radiatifs

- Courtes longueurs d'onde : La propriété de transparence de la couverture des serres vis-à-vis de certains rayonnements permet de pénétrer une grande partie du rayonnement solaire et plus précisément celui qui est compris entre 0.4 et 0.7 [μm] (rayonnement visible) et qui contribue au processus de la photosynthèse. C'est pourquoi les échanges radiatifs de court longueur d'onde ont été analysés en détail. (Nisan, 1969 ; Nisan et Dogniaux, 1975) [16].

Des programmes de calcul numérique ont été développés pour traiter les différents aspects de ce problème (Kozáni et al ; 1978) [9] Sur un plan quantitatif, la portion du rayonnement extérieur transmis dans la serre a été estimée d'environ 60%, le reste étant absorbé ou réfléchi

Par les parois et les différentes structures. La grande partie du rayonnement pénétrant est interceptée ou absorbée par la culture surtout lorsque la culture est bien développée. La partie qui contribue à la photosynthèse peut être négligée car elle ne représente que 1 à 2 [%] du rayonnement global incident au sommet de la culture, mais la part du rayonnement réfléchi vers l'extérieur n'est pas négligeable dans certains cas, notamment le cas de cultures hors sol. [17]

- **Grandes longueurs d'onde** : Les échanges se produisent essentiellement en grande partie entre le sol, les plantes, les parois, et l'extérieur. La nature de couverture (Nisan, 1969) [15]. Joue un rôle très important dans ce genre d'échange car les propriétés de transmission dans l'infrarouge thermique varient suivant la nature du matériau. Les matériaux utilisés pour la couverture doivent être le plus transparent possible dans le domaine du visible et bloquent les infrarouges et donnent naissance à ce que l'on appelle (l'effet de serre) c'est le cas du verre opaque aux grandes longueurs d'onde. Du fait de son importance, les échanges radiatifs entre les différents constituants de la serre ont été profondément étudiés par nombreux auteurs, où la simulation du rayonnement était l'objectif principal de ces études. Par conséquent, ces travaux ont conduit à élaborer des modèles très détaillés qui prennent en compte l'ensemble des échanges radiatifs en fonction de facteurs caractéristiques.

III.7.3 Échanges conductifs

Les échanges de chaleur par conduction concernent essentiellement les transferts thermiques dans le sol et à travers les parois. Compte tenu de la faible épaisseur des parois ces conductions peuvent être négligées (Issanchou, 1991) [18].

Le sol n'est pas homogène verticalement, il peut être constitué par différentes couches qui ont des propriétés thermiques différentes (composition, humidité). De plus, les propriétés thermiques du sol peuvent varier en fonction du temps. C'est pourquoi on utilise des modèles numériques complexes, dans lesquels le sol peut être représenté comme l'empilement de couches homogènes ou les équations de base, régissant le phénomène de conduction, peuvent être appliquées. (Kimball, 1986) [19]

III.7.4 Échanges convectifs

Les échanges convectifs sous serre ont lieu entre l'air et les parois, entre l'air et les cultures et entre l'air et le sol. On a l'habitude de distinguer trois types de convection : libre,

Forcée ou mixte et l'écoulement peut être laminaire ou turbulent. On détermine chaque régime

D'écoulement en faisant intervenir les nombres sans dimensions tel que le nombre de Reynolds et le nombre de Grashof.

•**Convection libre** : La convection est dite libre lorsque le mouvement du fluide est dû à l'action simultanée des différences de température qui existent dans le milieu et d'un champ de force massique. Par exemple, au cours de la journée, la surface du sol s'échauffe car son bilan radiatif est positif. La température de l'air croît et sa masse volumique décroît. Une particule d'air chaud reçoit ainsi de la part de l'air environnant plus froid, une poussée d'Archimède. Cette particule d'air s'élève donc est remplacée par de l'air plus froid qui s'échauffe à son tour et le processus continue. Cet exemple ne fait intervenir que des forces de pesanteur et la convection libre est alors qualifié de convection naturelle.

•**Convection forcée** : La convection est dite forcée lorsque le mouvement du fluide est provoqué par un champ de force extérieur. Le coefficient de convection forcée entre une paroi et l'air dépend de la vitesse du vent qui est lui-même la résultante du gradient local de la pression atmosphérique.

•**Convection mixte** : Ce cas se rencontre souvent, quand la vitesse du vent est faible. Les mouvements de l'air sont alors produits à la fois par les facteurs qui entretiennent le vent et par les gradients verticaux de température. Les transferts de chaleur et de masse sont alors dus en partie à la convection naturelle et en partie à la convection forcée.

III.8 Mouvements de l'air

L'une des différences majeures entre les conditions climatiques à l'intérieur de la serre et celles qui règnent à l'extérieur concerne les vitesses du vent qui entrent en jeu. La vitesse moyenne du vent est de l'ordre de 4 m. s^{-1} à l'extérieur tandis qu'elle est nettement plus faible à l'intérieur. Le rôle d'abri joué par la structure de la serre est essentiel car la croissance des plantes est sensiblement réduite lorsqu'elles sont soumises à des vitesses d'air très supérieures à 0.5 m. s^{-1} . Néanmoins, le mouvement d'air est nécessaire car il facilite les échanges de chaleur, de vapeur d'eau et du dioxyde de carbone entre les plantes et l'air environnant. Même

Dans le cas d'une serre fermée, l'air à l'intérieur n'est pas complètement au repos du fait qu'il existe des gradients thermiques (différence de températures). Ces gradients créent des mouvements d'air convectifs. Par ailleurs, la serre n'étant pas complètement étanche, des mouvements d'air peuvent être induits par le vent extérieur. Parfois également, les mouvements d'air sont créés par l'utilisation du chauffage ou de ventilateurs pour contrôler le microclimat à l'intérieure de la serre. Nous distinguons donc deux mécanismes prépondérants qui mettent en mouvement l'air dans la serre :

- Les forces de flottabilité qui correspondent à la poussée d'Archimède : Elles sont fonction de la densité de l'air. Elles même dépendent de la température.
- La force motrice générée par le vent extérieur (ou par les ventilateurs). Elle met en action les masses d'air dans la serre et crée des zones de surpression ou de dépression.

III.9 Aération

Le but primordial de la ventilation est de dissiper l'excès de chaleur, assurer l'échange de CO₂ et d'O₂, et maintenir l'humidité à un niveau acceptable. En hiver, la ventilation évacue le surplus d'humidité et assure des conditions climatiques convenables, alors qu'en été la ventilation présente un moyen de refroidissement et d'extraction de vapeur d'eau. En outre, il est parfois nécessaire d'utiliser filets anti insectes de très petites mailles afin de contrer la menace des insectes vecteurs de virus sur les cultures sous abris serre. Malheureusement la présence de ces filets sur les ouvrants d'aération provoque une chute du taux de renouvellement d'air entraînant une augmentation de température et d'humidité de l'air.

Ces conditions sont éprouvantes pour la culture car elles pénalisent le rendement et la qualité des produits. Dans ces conditions, les performances en ventilation des serres constituent un facteur majeur de la production. L'aération naturelle des serres est la méthode de ventilation la plus couramment utilisée, car la plus pratique et la plus économique. L'échange d'air entre l'intérieur et l'extérieur de la serre par aération naturelle contribue à évacuer l'excès d'énergie captée par la serre et à limiter la surchauffe de l'air interne. Elle constitue aussi un paramètre clef pour la maîtrise du microclimat de la serre ou les échanges

Entre la serre et son environnement car elle intervient dans son bilan d'énergie et de masse (air, CO₂ et H₂O).

Le renouvellement d'air ou l'aération peut être caractérisé par :

- a. Le taux de ventilation : V_E [$m^3 / m^2 h$] qui représente le débit volumique échangé par heure par unité de surface du sol de la serre ;

$$V_E = V_V A_G / [m^3 / m^2 h]$$

Où : V_V est le débit de ventilation en [m^3 / h ou m^3 / s], A_G est la surface du sol de la serre en [m^2]

- b. Nombre d'air échangé défini par :

$$N = V_V V_G / [m^3 / m^3 h = 1/h = h-1]$$

Où : V_G est le volume de la serre en [m^3]

Et avec une hauteur moyenne de la serre h , la relation entre les deux caractéristiques devient : $V_E = h \times N$

- c. Efficacité de la ventilation : qui représente le rapport du débit de ventilation V_V et l'aire des ouvrants A_V

$$V_{eff} = V_V A_V / [m^3 / m^2 h] \text{ ou } V_{eff} = N A_V / [1/m^2 h]$$

III.10 Hétérogénéité climatique

L'hétérogénéité climatique des serres a un effet important sur la variabilité de l'activité des cultures, notamment sur la transpiration et la photosynthèse. Cette hétérogénéité pourrait être particulièrement forte dans les serres plastiques de type tunnel. Les transferts radiatifs et convectifs contribuent principalement à cette hétérogénéité. Quelques études (Haxaire et al ; 1999) [14] ont mis en évidence cet aspect et ont comparé des données mesurées et simulées, aussi bien sous ciel dégagé que sous ciel nuageux.

III.11 Les matériaux de couverture

III.11.1 Le Verre

Le verre minéral plat transparent ou translucide est un silicate de chaux et soude (silice 71 à 74 % chaux 10 à 15 % et Soude 13 à 17 %). Les différents types de verre utilisés dans les cultures sous serre sont : Le verre transparent ou clair (appelé verre horticole) ; Le verre martelé ou cathédrale (verre horticole coulé), le verre horticole à faible émissivité, le double vitrage, le verre isolant, le verre trempé, le verre armé, et le verre feuilleté.

III.11.2 Les matériaux plastiques

• Les matériaux plastiques rigides

Ces matériaux appelés également verres organiques, se présentent soit sous forme de plaques rigides d'une épaisseur de l'ordre du 4 mm (PVC, Polyester), soit sous forme de plaques à double ou triple paroi (polycarbonate, poly-méthacrylate de méthyle). Ces caractéristiques sont :

- Plus léger, moins rigides.
- Résistance aux chocs (grêle) nettement supérieure.
- Isolation thermique proche du verre.
- Propriétés optiques voisines du verre, mais moins durables et inflammable. On peut citer quatre types principaux de ce type de plastique rigide : Le polyester armé de fibres de verre (PRV), le chlorure de polyvinyle bi orienté (PVC bi orienté), le polycarbonate (PC), le poly méthacrylate de méthyle (PMMA).

• Les matériaux plastiques souples (films) :

Ce sont des matériaux plastiques souples ou films souples utilisés sur des structures simples et économiques sur des constructions plus élaborées, mais à charpente plus légère que celles des serres vitrées. Le choix de l'utilisation se fait généralement à partir des caractéristiques de ces matériaux qui dépendent en grande partie de leur composition chimique. Les films les plus utilisés sont à base de polyéthylène ou plus exactement de polyéthylène à basse densité (PE bd) avec de nombreux produits dérivés, (PE thermiques). Ces caractéristiques sont :

- Légers et de faible densité (de 0,9-1,7).
- Résistance mécanique élevée, même pour de faibles épaisseurs.
- Une bonne résistance chimique.
- Propriétés optiques proches de celles de verre quand ils sont neufs, performance thermique plus variable.
- Imperméables pour éviter l'infiltration lors de condensation et d'égouttage sur la paroi froide.

III.12 Conclusion

La serre solaire à économie d'énergie qui désigne la serre à pente unique avec un rideau d'isolation thermique est devenue la principale mesure de culture protégée et la serre typique de chine. En raison de son faible coût en capital, le large choix de matériaux structurels et la très faible consommation de charbon qui été l'énergie principale pour la serre en Chine, elle a atteint des avantages économiques élevés et ne cause pas ou cause peu de pollution à l'environnement. Cependant, les formes de structure de ces serres sont très différentes les unes des autres, leurs caractéristiques thermiques sont également différentes, ne sont pas satisfaisants et nécessitent une amélioration. La chine l'a prouvé. Bien que des problèmes existent, il n'y a pas de doute que la serre solaire soit utilisée plus largement pour une utilisation efficace de l'énergie solaire et pour une meilleure qualité et un meilleur rendement des cultures. Les problèmes existants entraîneraient des innovations qui perfectionneraient la structure des serres et les techniques de culture à l'avenir

Chapitre IV différents système de chauffage de serre agricole calcul et dimensionnement

IV.1 Introduction

En Algérie, les puits d'eau chaude qui étaient destinés depuis plusieurs décennies pour la consommation humaine et pour l'irrigation, ne furent exploités pour le chauffage des serres agricoles qu'à partir des années 70 et c'était une contribution assez modeste de l'énergie géothermale dans le développement du secteur agricole. Le chauffage des serres a commencé d'être appliqué au début de 1950 en Hollande, en Belgique et notamment dans les cultures ornementales ; les pays comme l'Italie, la France et l'Espagne ont considéré jusqu'à lors que les conditions favorables d'ensoleillement et de température ne justifiaient pas tel outil de production. Dans les années 1960, le coût de la thermie était tel que dans les installations réalisées, on cherchait à réduire le coût d'investissement sans se soucier du coût de fonctionnement auxquels conduisait le système de chauffage et de climatisation. Toutefois, des améliorations immédiates et faciles à réaliser de l'équipement des serres ont été rationalisées, comme le réglage des brûleurs des chaudières, l'amélioration de l'étanchéité et l'isolation des tuyaux d'amenée.

IV.2 Bilan thermique de la serre

IV.2.1 Modélisation mathématique

Nous approchons le fonctionnement réel de la serre agricole par l'utilisation de la méthode dite des nœuds, cette méthode nous permet de découper le système en plusieurs sous-systèmes, afin de faciliter la modélisation, pour cela nous proposons de découper le système en trois sous-systèmes, voir **figure IV-1**- Les nœuds sont numérotés comme suit :

(1) : la couverture de la serre.

(2) : l'air intérieur de la serre.

(3) : le sol.

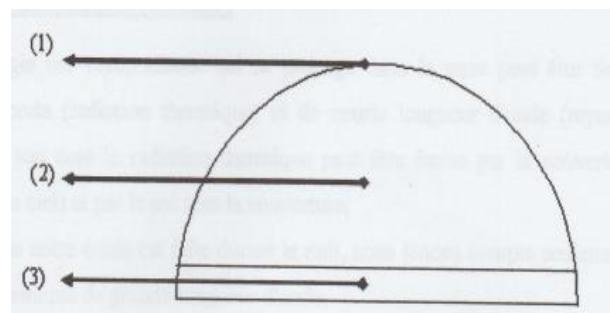


Figure IV.1 : système de modélisation de la serre

IV.2.2 Hypothèses simplificatrices

On fait les hypothèses suivantes :

- 1- La température est uniforme au niveau de la couverture, l'air intérieur et le sol.
- 2- Le sol est sec.
- 3- Les déperditions dues à l'humidité sont négligeables.
- 4- Le sol est nu.

IV.2.3 Bilan d'énergie de la serre

Dans ce qui suit, nous allons étudier les transferts de chaleur par rayonnement convection conduction et par renouvellement d'air, entre les différents sous-systèmes de la serre et l'extérieur et qui sont représentés dans la figure (IV.2).

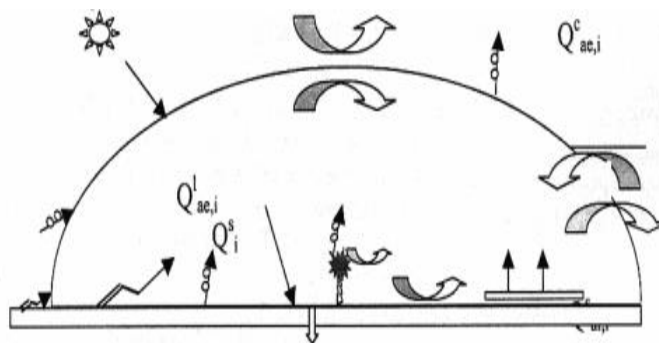


Figure IV.2: Mise en évidence des échanges thermiques au travers la serre

IV.2.4 Bilan d'énergie au niveau de la couverture

IV.2.4.1 L'échange radiatif

L'énergie par rayonnement qui se propage dans la serre peut être de grande longueur d'onde (radiation thermique) et de courte longueur d'onde (rayonnement solaire), de son côté la radiation thermique peut être émise par la couverture vers l'extérieur (le ciel) et par le sol vers la couverture.

Puisque notre étude est faite durant la nuit, nous tenons compte seulement de la radiation thermique de grande longueur d'onde.

A- Les échanges radiatifs entre le sol et la couverture

Cette puissance s'exprime de la façon suivante :

$$Q_{s,c}^r = \varepsilon_c \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot F_{s,c} \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_c^4) \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

ε_s : L'émissivité du sol.

ε_c : L'émissivité de la couverture.

σ : Constante de Stefan Boltzmann. ($\sigma:5,67 \cdot 10^{-8}(\text{w/m}^2\text{K})$)

$F_{s,c}$: facteur de forme entre le sol et la couverture.

A_s : Surface du sol.

T_s : température du sol (°C).

T_c : température de la couverture (°C).

B- Les échanges radiatifs entre la couverture et le ciel

L'expression de cette puissance est donnée par [4] :

$$Q_{c,\text{ciel}}^r = \frac{\sigma \cdot A_c \cdot (T_c^4 - T_{\text{ciel}}^4)}{\frac{1-\varepsilon_c}{\varepsilon_c} + \frac{1}{F_{c,\text{ciel}}} + \frac{1-\varepsilon_{\text{ciel}}}{\varepsilon_{\text{ciel}}} \cdot \frac{A_c}{A_{\text{ciel}}}} (W) \quad (\text{IV.2})$$

Comme la surface de la couverture est très petite devant celle $\frac{1-\varepsilon_{\text{ciel}}}{\varepsilon_{\text{ciel}}} \cdot \frac{A_c}{A_{\text{ciel}}}$ du Ciel, alors : tend vers zéro. D'où

$$Q_{c,\text{ciel}}^r = \frac{\sigma \cdot A_c \cdot (T_c^4 - T_{\text{ciel}}^4)}{\frac{1-\varepsilon_c}{\varepsilon_c} + \frac{1}{F_{c,\text{ciel}}}} (W) \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

T_{ciel} : température équivalente à la Votre céleste.

A_c : surface de la couverture.

$F_{c,\text{ciel}}$: facteur de forme entre la couverture et le ciel.

IV.2.4.2 Les échanges convectifs

La convection est un phénomène de transfert de chaleur par le mouvement d'un fluide' par unité de temps, et la quantité de chaleur échange par convection entre un fluide se trouve à une température T_1 et un solide se trouve à une température T_2 , s'écrit :

$$Q = h \cdot A \cdot (T_1 - T_2) (w) \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

T_1 : température de fluide, T_2 : température de solide

h : coefficient de convection.

A : surface d'échange.

A- Les échanges convectifs entre la couverture et l'ambiance

Cette puissance convective est exprimée sous la forme :

$$Q^{c, amb} = h \cdot A \cdot (T_c - T_{amb}) (W) \quad (IV. 5)$$

Avec :

h_{ext} : coefficient d'échange convectif entre la couverture et l'extérieure en (W/m²°C).

B- Les échanges radiatifs entre la couverture et l'air intérieur :

Cette puissance est donnée par :

$$Q_{c,ai} = h_{int,ei} A_c \cdot (T_{ai} - T_c)(W) \quad (IV. 6)$$

Avec :

h_{int} , coefficient d'échange convectif entre la couverture et l'air intérieur. La variation de l'énergie interne au niveau de la couverture durant l'intervalle de temps ΔT est égale à la différence

Des énergies entrantes moins les sortantes d'où le bilan énergétique au niveau de la couverture qui s'écrit comme suit :

$$V_c \cdot cp_c \cdot \frac{dT}{dt} = Q_{sol,c}^r + Q_{ai,c}^c - Q^{c, amb} - Q_{c,ciel}^r \quad (IV. 7)$$

Avec :

V_c : volume du film (la couverture).

Cp_c : capacité calorifique du film.

IV.2.5 Bilan d'énergie au niveau de l'air intérieur

L'air intérieur échange de l'énergie par convection, avec la couverture et le sol ; et par fuites avec l'air extérieur, on considère qu'il n'y a pas d'échange radiatif et la température de la couverture est homogène.

IV.2.5.1 Les échanges convectifs

A- Les échanges convectifs entre la couverture et l'air intérieur

Cette puissance est donnée par la formule (IV.6)

Les échanges convectifs entre la couverture et l'air intérieur et le sol :

La puissance convective est donnée par [4]

$$Q_{ai,s}^c = h_{int_{ai,s}} \cdot A_s \cdot (T_s - T_{ai}) \dots \dots (W) \quad (IV.8)$$

Avec $h_{int_{ai, sol}}$: coefficient d'échange convectif entre l'air intérieur et le sol.

IV.2.5.2 Les échanges par renouvellement d'air

$$Q_{ren} = R_e \cdot cp_{ai} \cdot (T_{ai} - T_{ae}) (W) \quad (IV.9)$$

Avec :

cp_{ai} : Capacité calorifique de l'air intérieur.

R_e : Débit de renouvellement d'air.

Le renouvellement d'air se fait grâce aux fuites et aux ouvertures, pour sa détermination il faut prendre en compte les dimensions et l'emplacement des ouvertures.

Dans cette étude, nous fixons la valeur de R_s à $8 \cdot 10^{-4}$, et cela pour une serre étanche [a]. Ia bilan d'énergie au niveau de l'air intérieur est donné par l'équation :

$$V_{ai} \cdot cp_{ar} \cdot \frac{dT_{ai}}{dt} = Q_{ai,sol}^c - Q_{ai,c}^c - Q_{ren} \quad (IV.10)$$

Avec :

V_{ai} : volume de l'air intérieur

IV.2.6 Bilan d'énergie au niveau du sol intérieur

✓ Les **échanges radiatifs**

La puissance radiative existante au niveau du sol pendant la nuit est celle qui est émise vers la couverture. Elle a été déjà définie par l'équation (IV.1).

✓ Les **échanges convectifs**

La puissance convective existante entre le sol l'air intérieur est donnée par l'expression (IV.8)

✓ Les **échanges conductifs**

La conduction est un phénomène de transfert de chaleur à travers un milieu matériel sans mouvement interne. La quantité de chaleur par conduction s'exprime par la formule [8] :

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (IV.11)$$

Le signe moins indique que la chaleur se transmet du milieu le plus chaud vers le milieu le moins froid

Avec :

K : coefficient conduction.

A : section du solide.

dt : différence de température.

dx: épaisseur de l'élément.

Dans le modèle de la serre, on considère que la température des tuyaux est uniforme et pour une profondeur d'un mètre, la température limite est estimé généralement à 12°C La puissance conductive est donnée par l'expression suivante [8] :

$$Q_{\text{cond.si}}^c = K_{si} \cdot A \quad (IV.12)$$

Avec :

ΔT : exprime la difrence de température entre le sol intérieur et la température limite.

$$\Delta T = T_{si} - T_{limite} \quad (IV.13)$$

K_{si} : Coefficient de conduction du sol.

L : épaisseur du sol égale à 1 mètre.

Le bilan thermique au niveau du sol s'écrit sous la forme suivante.

$$V_{si} \cdot cp_{si} \cdot \frac{dT}{dt} = -Q^c_{s_{si,ai}} - Q^r_{si,c} - Q^c_{cond,si} \quad (IV.14)$$

Avec :

V_{si} : Volume du sol intérieur.

cp_{si} : Capacité calorifique du sol.

T_{si} : Température du sol intérieur.

IV.2.7 Déterminations des factures des formes

Vu l'importance des facteurs de forme dans le bilan thermique, nous avons besoin de décrire en détail l'application des expressions ou le facteur de forme intervient dans les couples de surfaces finies rencontrées dans la serre décrite au début de ce chapitre, mais ceci nécessite une résolution de plusieurs fonctions, alors que la détermination du facteur de forme devient difficile et compliquée. La couverture de la serre considérée est décomposée en plusieurs segments, représentée par la figure (IV.3).

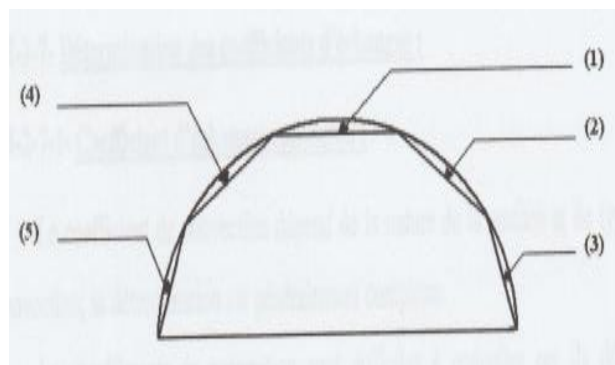


Figure IV.3 : facteur de forme de serre

Pour simplifier le travail, nous avons choisi les expressions données par :

$$F_{c,ciel} = \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (IV.15)$$

Avec :

$F_{c,ciel}$: facteur de forme entre le segment d'indice (i) de la couverture et du ciel. En ce qui concerne le facteur de forme entre la surface inclinée et le sol, nous avons l'expression donnée Par[] :

$$F_{sol,s} = \frac{1+\cos \alpha}{2} \quad (IV. 16)$$

IV.2.8 Détermination de la température du ciel

Pendant la nuit" les pertes les plus importantes dans les serres non chauffées se font par rayonnement infrarouge, et afin de calculer ces pertes, il est donc très important de déterminer la température équivalente du ciel. On trouve dans la littérature un certain nombre de relations simples ou la température du ciel T_{ciel} (en K) est une fonction linéaire de la température ambiante T_{amb} (en K), depuis

$T_{ciel} = T_{amb}$ jusqu'à $T_{ciel} = T_{amb} - 20$, en passant par

$T_{ciel} = T_{amb} - 6$ et $T_{ciel} = T_{amb} - 12$.

Swanbank [2] propose:

$$T_{ciel} = 0.552 \cdot T_{amb}^{1.5} \quad (IV. 17)$$

De même la température du ciel dépend beaucoup de la nébulosité et de l'humidité.

Pour cette étude nous avons choisi la relation suivante.

$$T_{ciel} = T_{amb} - 10 \quad (IV.18)$$

IV.2.9 Détermination des coefficients d'échanges

IV.2.9.1 Coefficient d'échanges convectifs

Le coefficient de convection dépend de [a nature de la surface et de type de la convection" sa détermination est généralement complexe.

Les coefficients de convection sont difficiles à connaître car ils dépendent sensiblement du mouvement de l'air, en particulier de la vitesse de l'air au niveau de la surface considérée

A- Coefficient d'échange convectif extérieur

Pour calculer le coefficient h_{ext} de l'échange thermique par convection avec l'ambiance, on utilise la relation semi-empirique suivante.

$$h_{ext} = 1,161 \cdot [1,14 \cdot (T_c - T_{amb})^{0.5} + 6,97 \cdot Vv^{1.6}]^{0.5} \quad (IV. 19)$$

Avec :

V_v : vitesse du vent (m/s)

B- coefficient d'échange convectif intérieur

✓ Coefficient d'échange convectif entre la couverture et l'air intérieur

On utilise pour ce type de coefficient relation semi-empirique suivante :

$$h_{int_{c,ai}} = 3,69(T_c - T_{amb})^{0,25} \cdot (1,161) \cdot \left[\frac{W}{m^2} \cdot c^\circ \right] \quad (IV.20)$$

✓ Coefficient d'échange convectif entre le sol et l'air intérieur

Ce type de coefficient est défini par [2]

$$h_{int_{ais}} = \frac{cp_{ai}}{R_s} \cdot \left(\frac{w}{m^2} \cdot c^\circ \right) \quad (IV.21)$$

Avec :

R_s : La résistance aérodynamique du sol.

Dans le cas où nous considérons la serre comme un capteur solaire sans végétation, nous utilisons d'après [2] :

$$R_s = \frac{250}{\Delta T^{0,33}} \dots \left[\frac{s}{m} \right] \quad (IV.22)$$

Avec :

ΔT : La différence de température entre le sol et l'air intérieur.

IV.2.9.2 Coefficient d'échanges radiatifs

La puissance radiative décrite dans le paragraphe (II-3) est écrite sous la forme :

$$Q_r = h_r \cdot A \cdot \Delta T \quad [W] \quad (IV.23)$$

✓ Coefficient d'échange radiatif entre la couverture et le ciel

Il est donné par :

$$h^{r_{c,ciel}} = \frac{\sigma \cdot (T^2 + T_{ciel}^2) \cdot (T_c + T_{ciel})}{\frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c} \cdot \frac{1}{F_{c,ciel}}} \quad (IV.24)$$

A- Coefficient d'échange-radiatifs entre la couverture et le sol

Il est donné par :

$$h^{r s, c} = \varepsilon_{sol} \cdot \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot F_{s,c} \cdot (T_s^2 + T_c^2) \cdot (T_s + T_c) \quad (IV.25)$$

IV.2.9.3 Coefficient d'échanges conductifs

La conduction n'existe qu'au sol, ou se dernier cde de la chaleur vers le bas, cette énergie peut être utilisé pour le stockage, le coefficient de conductivité k est considère constant et égale à **1.1** (w/mC°), donnée par [4].

IV.2.10 Système d'équation différentielle

Après avoir détaillé les bilans d'énergies au niveau de chaque sous-système, on obtient un système d'équations différentielles formé par les expressions (IV.7), (IV.10), (IV.13), dont les variables sont respectivement : le temps, la température, la température de l'air intérieur et la température du sol. Les équations différentielles sont exprimées comme suit :

$$V_c \cdot cp_c \cdot \frac{dT}{dt} = Q_{sol,c}^r + Q_{ai,c}^c - Q_{c,amb}^c - Q_{c,ciel}^r \quad (IV.26)$$

$$V_{ai} \cdot cp_{ai} \cdot \frac{dT_{ai}}{dt} = Q_{ai,sol}^r - Q_{ai,c}^r - Q_{ren} \dots \quad (IV.27)$$

$$V_{si} \cdot cp_{si} \cdot \frac{dT}{dt} = -Q_{si,ai}^c - Q_{si,c}^r - Q_{cond,si}^c \quad (IV.28)$$

Ce système est le bilan global de ra serre, sa résolution nécessite

- ✓ L'utilisation d'un modèle mathématique et informatique.
- ✓ L'utilisation d'un programme tenant n PP25. On préconise l'utilisation des tubes en polypropylène de 25 mm de diamètre car ils présentent les avantages techniques et économiques suivants :

Augmentation considérable de la surface d'échange, épaisseur réduite favorisant les échanges entre l'eau et le milieu ambiant, les annelés provoquent une turbulence à l'intérieur du tube augmentant ainsi le brassage de l'eau et la dispersion des calories, diminution de la formation des bulles d'air dans le circuit de chauffage, bonne répartition des débits dans les

Tubes de chauffage. La disposition des tuyaux de chauffage dans la serre assure la répartition de l'énergie, en tenant compte des ouvertures et des portes d'aération. La disposition qui se trouve actuellement dans la serre étudiée est en boucle simple (aller/retour) ; cette façon est très économique mais présente une distribution non homogène de la chaleur et la température de l'eau chaude diminue avec la distance parcourue.

IV.3 Besoin en énergie d'une serre

La demande en chaleur nécessaire pour maintenir une température désirée de l'air intérieur, provenant de l'eau géothermale doit être égale à la quantité de chaleur perdue.

Le besoin de chaleur peut aussi être exprimé, en se rapportant à la surface du sol couvert :

$$Q = k' A_s (T_{ai} - T_{ae}) \quad (IV.29)$$

Expression où : k' est le coefficient de déperdition de chaleur calculé expérimentalement et exprimé en W/m^2 de surface couverte. A_s est la surface du sol couvert. T_{ai} est la température de l'air intérieur de la serre et peut être considérée comme température de consigne et est exigée par la végétation, pour lui assurer un développement favorable.

IV.4 Dimensionnement de L'échangeur

Le dimensionnement de l'échangeur se résume au calcul de la surface d'échange, ce qui revient au calcul de la longueur de l'aérotherme nécessaire pour chaque serre. Ceci dépend essentiellement du besoin en énergie et à la température d'entrée et de sortie de l'eau dans les tuyaux de chauffage. Par exemple, si $T_{ai} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$, la surface de la serre couverte par le polyéthylène $A_s = 404 \text{ m}^2$, $k' = 10,5 \text{ cal/h/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, nous pouvons calculer le besoin énergétique comme suit : $Q = 10,5 \times 404 (14 - 2) = 59,105W$ Exemple de calcul de la longueur de l'aérotherme et du nombre de nouds : Comme la quantité de chaleur perdue à travers la surface de l'aérotherme vers l'air intérieur de la serre, due aux différents modes de transferts, doit être égale à la chaleur apportée par le débit d'eau géothermale entre son entrée et sa sortie, alors on écrit l'équation suivante :

Exemple de calcul de la longueur de l'aérotherme et du nombre de nouds : Comme la quantité de chaleur perdue à travers la surface de l'aérotherme vers l'air intérieur de la serre, due aux différents modes de transferts, doit être égale à la chaleur apportée par le débit d'eau géothermale entre son entrée et sa sortie, alors on écrit l'équation suivante :

$$Q_g = Q_d \quad (IV.30)$$

Expression où : Q_d est la puissance amenée par l'eau chaude et Q_g est la puissance dissipée à travers le tuyau chauffant.

$$Q_g = K_{ch} \cdot A_{ch} \cdot T_{ML} \quad (IV.31)$$

$$Q_d = m \cdot C(T_{ee} - T_{se}) \quad (IV.32)$$

Avec :

K_{ch} : coefficient de transfert à travers l'échangeur (tuyau de chauffage) ($\text{kcal/h/m}^2\text{°C}$),
 A_{ch} : surface du tuyau (m^2), T_{ML} : moyenne logarithmique de la température (°C), T_{ee} et T_{se} sont respectivement la température d'entrée et de sortie de l'eau chaude dans la serre, m est le débit massique de l'eau de chauffage.

$$T_{ML} = \frac{T_{ee} - T_{se}}{\left[\frac{\ln(T_{ee} - T_{ai})}{T_{es} - T_{ai}} \right]} \quad (IV.33)$$

$$A_{ch} = 0,0785 \times L$$

On peut aussi remplacer T_{ML} par ΔT où

$$\Delta T = T_m - T_{ai} \quad (IV.34)$$

Alors l'équation (3) devient :

$$Q_g = K_{ch} \cdot A_{ch} \cdot \Delta T \quad (IV.35)$$

Avec :
$$T_m = \frac{T_{se} + T_{ee}}{2} \quad (IV.36)$$

Le coefficient K_{ch} dépend de la nature de l'échangeur ainsi que de la température de l'eau qui y circule. En vertu des équations précédentes, l'expression donnant la longueur de l'aérotherme s'écrit :

$$L = V \cdot \rho \cdot \frac{C_p(T_{ec} - T_{se})}{0,0785} \cdot K_{ch}(T_m - T_{ai}) \quad (IV.37)$$

Exemple : Prenons $T_m = (65 + 25) / 2 = 46\text{°C}$.

Comme le tuyau de chauffage est un aérotherme en polypropylène de type PP 25, alors on prend $K_{ch} = 13,5 \text{ kcal/h/}^\circ\text{C}$, pour la gamme de température de l'entrée de l'eau $65 - 67,5 \text{ }^\circ\text{C}$, la longueur L sera égale : $L = 50904/[0,0785 \times 13,5(46 - 14)]$, soit $L = 1501 \text{ m}$. Le nombre de nœuds N est fonction de la longueur de la serre et de l'arrangement des plantes qui est limité par la surface et les conditions agro climatiques. On écrit alors :

$N = A_{ch}0,0785.L$ avec L : longueur de la boucle.

Calcul du débit d'eau de chauffage dans une serre : Il est important de rappeler que la température de sortie de l'échangeur doit être la plus basse possible, généralement elle est prise entre 25 et $27 \text{ }^\circ\text{C}$ (valeurs testées expérimentalement). Une basse température présente deux avantages considérables : extraction du maximum de chaleur de l'eau géothermale et optimisation de l'utilisation des ressources géothermales pour le chauffage des serres.

$$V = \frac{m}{\rho} = k' \cdot \frac{A_s(T_{ai}-T_{ae})}{\rho} \cdot C_p(T_{ee} - T_{se}) \left(\frac{\text{enm}^3}{\text{h}} \right) \quad (\text{IV.38})$$

Cette expression est déduite des équations précédentes où : V est le débit volumique d'eau dans une serre exprimé en (L/s/serre) ou bien (l/s/h), ρ est la masse volumique de l'eau. Pour une température d'entrée de l'eau égale à 65°C , le débit d'eau nécessaire pour chauffer la serre est :

$$V = \frac{59105}{[1000.4180(65-27)]} = 3, \frac{710^{-4}\text{m}^3}{\text{soitV}} = \frac{0,37\text{L}}{\text{s}} \quad (\text{IV.39})$$

La surface maximale du sol susceptible d'être chauffée par le puits géothermal dépend du débit maximal de l'eau en tête de puits ; elle peut être calculée en utilisant l'équation suivante :

$$S_{max} = \frac{V_{max}}{V'} \quad (\text{IV.41})$$

Expression où : S_{max} (m^2) est la surface maximale pouvant être chauffée par un débit V_{max} , qui est le débit volumique du puits non vanné (L/s). V' étant le débit nécessaire pour chauffer une serre (L/sm²).

Note :

A cause de ex aux ou de virus covid19 nous ne pouvons pas de faire de stage demandé par l'encadreur et pour cela prenons l'exemple de calcul qui est publié dans la récrie énergie renouvelable donc le thème (Utilisation de l'Energie Géothermique pour le Chauffage des serre agricoles au sud algérien. **Par : B. Bouchekima et Y. Babi**

IV.5 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est une serre mon tunnel protégée du vent et entourée par d'autres serres mon tunnel se trouvant à la station expérimentale ITDAS de Hassi Ben Abdallah près d'Ouargla (**Fig. 1**). La station se trouve entourée par une palmeraie dont l'eau d'irrigation provient d'un puits albien artésien se trouvant à une distance de 1,5 km de la serre expérimentale ; la température et le débit en tête de puits sont respectivement environ 65 °C et 200 L/s. C'est une serre mon tunnel dont les caractéristiques sont les suivantes :

Surface couverte : $(45,7 \times 8,7) \text{ m}^2$, orientée vers le Sud-est, Surface latérale de la paroi :

$(45,7 \times 10) \text{ m}^2 = 457 \text{ m}^2$, Hauteur maximale moyenne = 3,30 m, Surface des portes :

$2 \times (2,5 \times 3) = 15 \text{ m}^2$, Coefficient de forme $S_s / S_c = 0,85$, Surface du sol couvert

$(47,5 \times 8,5) = 403,75 \text{ m}^2$, Volume de la serre = 1093 m^3 .

IV.6 Chauffage de la serre et mesures effectuées

Le système de chauffage est constitué par une vanne thermo statée et un tube très long en plastique façonné en anneaux de type aérotherme qui permet de maintenir la température du sol à une température d'environ 18 °C. L'aérotherme est placé en boucle simple (allée/retour). L'aérotherme utilisé présente les caractéristiques suivantes : PP25 : polypropylène de diamètre 25 mm, le coefficient de déperdition de chaleur $K_{ch} = 13,5 \text{ kcal/h/m}^2 / ^\circ\text{C}$ posé sur le sol, la pression normale d'utilisation est de 0,5 à 1,5 bars, la pression maximale admissible sous une température de 67 à 70 °C est de 2 à 2,5 bars, la pression d'éclatement est de 6 à 7 bars, la surface externe d'un mètre linéaire du tube est de 0,0785 m². La régulation automatique de la température dans la serre se fait par vanne thermo statée dotée d'une sonde et d'un régulateur de température fixant une température de consigne entre 10 et 40 °C. La puissance installée de chauffage est de 0,59 kW. La température est mesurée à différents niveaux : air intérieur, air extérieur, paroi, sol intérieur, sol extérieur à différentes profondeurs. Les températures de l'air intérieur et extérieur sont mesurées à l'aide des thermographes. La température du sol est mesurée à l'aide d'un thermomètre approprié enfoncé à 20 cm en profondeur. L'humidité relative de l'air à l'extérieur et à l'intérieur de la serre est mesurée en continu à l'aide de deux hydrographes à cheveux. On obtient ainsi une courbe représentative des variations de l'humidité relative en fonction du temps (**Fig. 5, 6**).

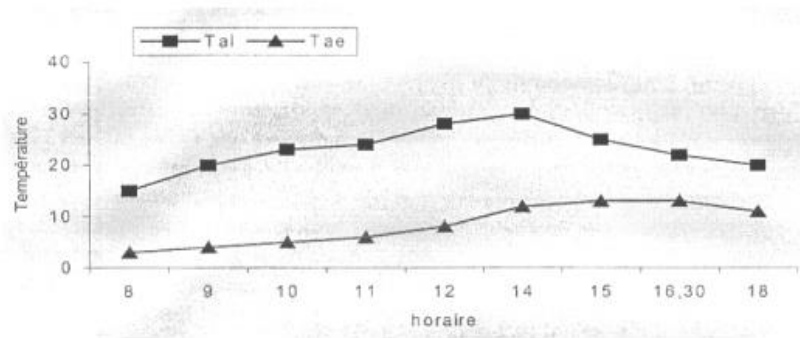


Figure IV.4 : Température de l'air intérieur et extérieur

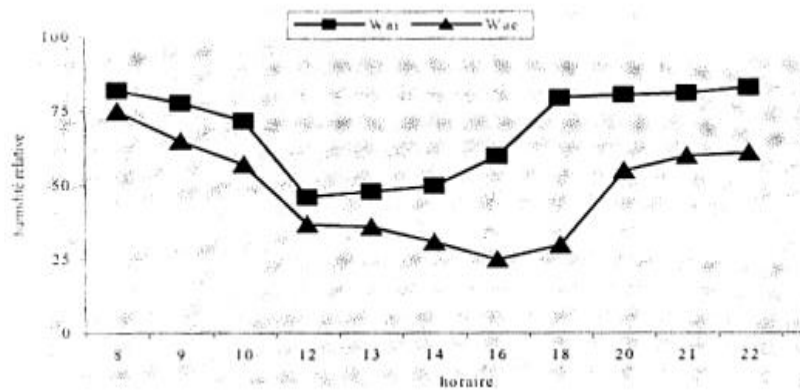


Figure IV.5 : Humidité relative de l'air intérieur et extérieur

IV.7 Résultats expérimentaux

Du fait que l'aérotherme est posé sur le sol, la température de celui-ci pendant la journée dans la période de chauffage s'élève nettement par rapport à celle du sol extérieur. Cette augmentation favorise la germination ainsi que le développement de la plante. Le transfert thermique par conduction et convection à travers la paroi du corps chauffant a fait que la température de l'air intérieur de la serre augmente considérablement par rapport à celle de l'air extérieur, bien entendu l'excès de celle-ci est à éviter car le phénomène photosynthétique de la plante sera arrêté. Il faut donc que la température de l'air de la serre chauffée réponde aux exigences de la plante.

On remarque que l'humidité de l'air intérieur de la serre chauffée est assez élevée tout en ne dépassant pas 75 % pendant le jour, ceci est dû à l'aération statique en ouvrant les portes se trouvant aux extrémités de la serre. Il faut aussi noter que cette valeur est acceptable par la

Végétation et qu'un excès de l'humidité provoque un développement des maladies qui attaquent la plante à tout moment.

La température de l'air intérieur pendant le jour ne pose pratiquement pas de problème puisque le chauffage est dû à l'énergie solaire. L'apport de chaleur par énergie géothermale s'avère très visible pendant la nuit.

On remarque aussi qu'à partir de quelques heures du lever de soleil, les températures de l'air de la serre chauffée et témoin tendent à s'équilibrer. On rappelle que la nécessité de chauffage pendant cette durée n'étant pas indispensable. La figure 4 montre l'écart de température entre les deux serres. La meilleure valeur de l'humidité, pour obtenir une bonne activité de la plante et un bon fonctionnement du transport des éléments nutritifs, est de l'ordre de 80 % à une température de 25 °C. La serre chauffée de sa part, n'assure pas cette valeur, mais, l'améliore jusqu'à 60 % (Fig. 7) [23].

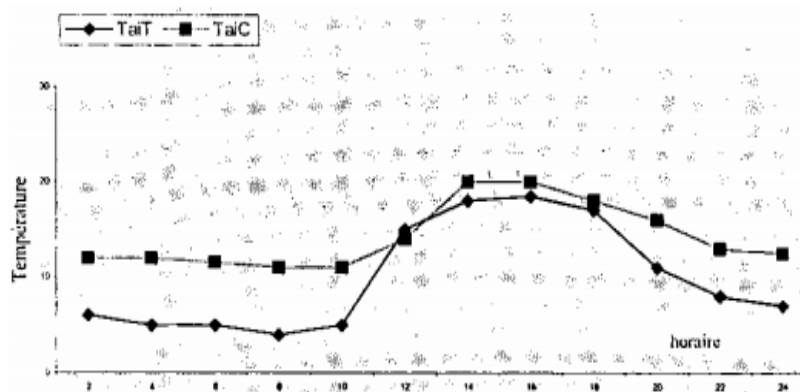


Figure IV.6 : Température de l'air intérieur des serres chauffée et témoin

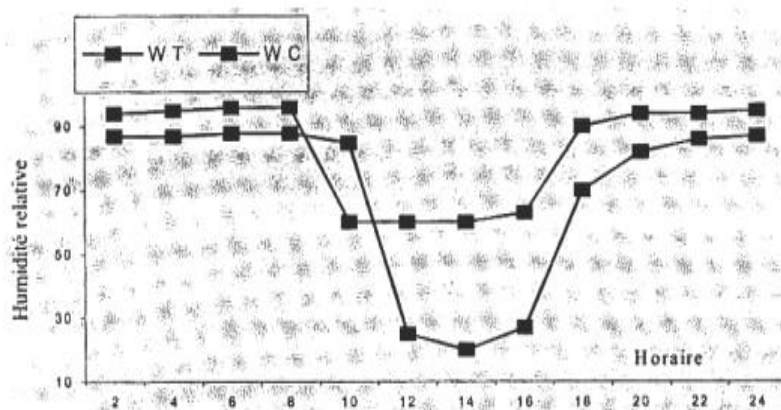


Figure IV.7 : Humidité relative : serre chauffée et serre témoin

➤ **Production agricole**

Un suivi de la production de ces deux serres pendant quatre mois a permis de mettre en évidence l'apport de chauffage pendant la période la plus froide de l'année, la figure 6 nous montre une comparaison productive cumulative entre les deux serres. Ainsi, on montre que le calibre du fruit est beaucoup plus important pour la serre chauffée que pour la serre non chauffée. Le rendement agricole rapporté au mètre carré de la surface plantée de la serre chauffée est nettement supérieur à celui de la serre non chauffée (témoin) (**Fig. 9**) [24].

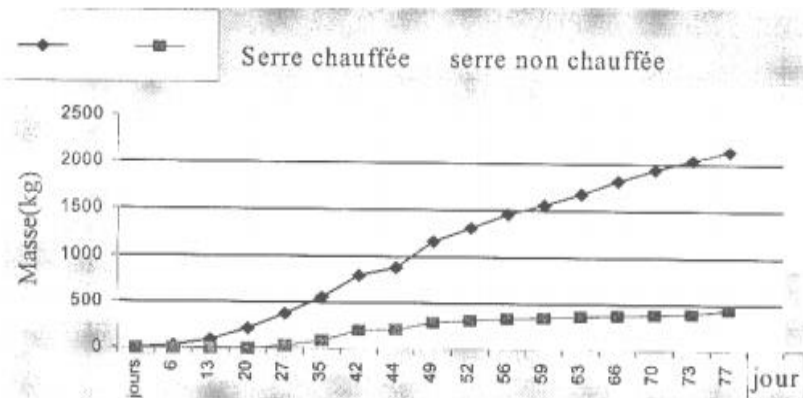


Figure IV.8 : Histogramme cumulé de la production en tomate

IV.8 Mise en équations du bilan énergétique

On considère un système unidimensionnel : serre de dimensions horizontales infinies. En fait, le modèle unidimensionnel ne correspond pas à la réalité (système à trois dimensions). Cette considération se rapproche d'une juxtaposition de plusieurs serres hémicylindriques pour constituer une serre dite multi-chapelle. Dans ce cas, le rapport surface de paroi sur la surface du sol tend vers 1 (en général, $S_c/S_s = 1,1$ à $1,2$). Dans le cas d'une serre mon tunnel, ce rapport tend vers 2, ce qui nous éloigne du modèle unidimensionnel. Car pour traiter les échanges par rayonnement, il faut prendre en compte des facteurs de formes des composants de la serre, ainsi le calcul du rayonnement serait plus compliqué.

Quant au flux de chaleur conductif dans le sol, le système unidimensionnel est suffisant dans notre étude, car la propagation de la chaleur se fait principalement vers la profondeur. Une distribution homogène des différentes variables d'intensité au niveau des surfaces d'échange entre la serre et son environnement (paroi, sol, air intérieur), cette hypothèse bien qu'elle ne corresponde pas à la réalité, a l'avantage de permettre la formulation d'équations dont les solutions représentent l'état moyen de ces variables. Les épaisseurs de la paroi et celle de la

Végétation sont très faibles pour pouvoir négliger les échanges conductifs. La végétation est uniformément répartie à la surface du sol : surface du sol et surface de la végétation sont égales, le facteur de forme végétation/sol est égal à 1 et est supposée opaque au rayonnement infrarouge thermique. L'air de la serre est supposé transparent du point de vue radiatif. [25]

IV.8.1 Bilan d'énergie au niveau de la couverture d'indice i

La puissance globale nette sur la couverture d'indice i de la serre représente l'énergie globale stockée par cette partie dans l'intervalle de temps dt, soit :

$$V_{pi} C_i \frac{dT_i}{dt} = Q_{ga} + Q_{IR,i}^r + Q_{ai,i}^c + Q_{al,i}^c + Q_{ai,i}^l + Q_{ae,i}^l + Q_i^{cond} + Q_{ch,pi}^r \quad (IV.41)$$

IV.8.2 Bilan thermique de l'air intérieur

L'air intérieur échange de la chaleur par convection avec la partie intérieure de la paroi et avec le sol intérieur, ainsi qu'avec la végétation. Une forme d'échange de chaleur se fait par un transfert d'air intérieur et extérieur qu'on appelle transfert par fuite (ou aération selon le taux de renouvellement de l'air intérieur (R)).

IV.8.2.1 Bilan de chaleur sensible

$$C_{ai} V_{ai} \frac{dT_i}{dt} = Q_{ai,i}^c + Q_{ai,s}^c + Q_{mem} + Q_{v,i}^c + Q_{ch} \quad (IV.42)$$

IV.8.2.2 Bilan des puissances de chaleur latente

$$V_{ai} \frac{dW_{ai}}{dt} = Q_{ai,s}^l + Q_{ai,p}^l + Q'_{mem} + ETP \quad (IV.43)$$

IV.8.2.3 Bilan des puissances au niveau du sol intérieur de la serre

Le bilan au niveau du sol s'écrit sous la forme suivante :

$$C_s V_s \frac{dT_s}{dt} = Q_{gs}^s + Q_s^r + Q_{ai,s}^1 + Q_{ai,s}^c + Q_s^{cond} \quad (IV.44)$$

IV.9 CONCLUSIONS

Cette étude concerne l'exploitation de la chaleur de la terre (géothermie) pour le chauffage des serres agricoles dans le but d'augmenter leur rendement. La modification du climat intérieur de la serre est reliée aux différents paramètres qui ont une influence sur l'humidité et la température durant la période de chauffage et donc sur le développement de la plantation durant son évolution. La mesure de la température et de l'humidité durant la période de chauffage s'effectue pour deux considérations différentes : l'air intérieur n'emmagasine pas de chaleur sous ses deux formes : chaleur sensible et latente. La température de l'air intérieur, en tenant compte de son inertie thermique, ne varie pas considérablement par rapport à celle mesurée sans tenir compte de l'inertie thermique, tout en sachant que la serre est une unité dépendante des variations du climat extérieur et varie continuellement avec celui-ci. L'augmentation du rendement de la serre chauffée, comparativement à la serre non chauffée, a été bien illustrée dans cette étude. Il serait donc fort utile de généraliser ce thème de recherche de grande importance sur le plan économique, en tenant compte de son impact sur l'environnement.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'énergie géothermique est l'une des plus importantes énergies renouvelables largement utilisées dans le monde, en raison de son absence de désavantages et de sa grande fiabilité, notamment en utilisation directe, utilisable en permanence et non liée aux changements d'air comme les autres énergies renouvelables.

Son utilisation répandue est due à la multiplicité des applications telles que la production d'électricité, le chauffage des habitations et la serre agriculture

Les calculs thermiques nous ont permis de déterminer les caractéristiques et l'emplacement des systèmes de chauffage (radiateurs) avec leur distribution

L'absence d'informations sur les propriétés chimiques de l'eau thermale nous a gênés à la sélection de matériau de l'échangeur de chaleur donc l'absence de la valeur du coefficient d'échange et la surface d'échange La Détermination des propriétés chimiques de l'eau thermale à l'avenir permettra la réalisation et finir de cette étude.

Enfin, l'étude de ce projet nous ouvre des voies prometteuses pour l'avenir de l'utilisation de l'énergie géothermique et la valorisation du gisement géothermique en Algérie, ceci dans le domaine de chauffage de l'habitation.

Références bibliographiques

[1] (en) « World Consumption of Primary Energy by Energy Type and Selected Country Groups, 1980-2004 » [archive], Energy Information Administration (consulté le 17 mai 2008).

[2] « Les cadastres solaires » [archive], sur photovoltaïque.info (consulté le 7 décembre 2016).

[3] (en) « Induction Versus DC Brushless Motors » [archive], sur www.tesla.com, 9 janvier 2007 (consulté le 22 janvier 2019)

(en) « Tesla's electric motor shift to spur demand for rare earth neodymium » [archive], sur Reuters, 13 mars 2018

[4] Énergie hydraulique [archive], sur le site actu-environnement.com, consulté le 7 janvier 2014

[5] « Hydroélectricité » (Archive • Wikiwix • Archive.is • Google • Que faire ?) [PDF], Direction Générale de l'Énergie et du Climat, p. 8.

[6] La géothermie, géant oublié des énergies renouvelables, en plein réveil [archive] sur le site greenunivers.com.

[7] « La géothermie se développe à Bouillante (Guadeloupe) » [archive], sur le site enerzine.com.

[8] Géothermie: du geyser au radiateur, Jean-Michel Coudert (ISBN 2715904711), (ISBN 9782715904712).

[9]: M.FATIHA; contribution à l'étude dynamique et thermique de l'air à l'intérieur d'une Serre en verre de type Venlo dans les régions des Aurès; les hauts plateaux est d'Algérie (Etude de simulation),

[10] Z.MOUSSA; contribution à la valorisation de l'énergie géothermique application à la région de Ouargla,

[11] Sun,Xiaolei,ZHANG,Weihua,GU,Sanjun, et al .Solar Plastic Greenhouses :An Epochal

Revolution of horticulture in china .Asian and australasain journal of Plant Science and Biotechnology,vol 1,no 2,p .43-47.

- [12] Etude de la convection sous serres fermées et ouvertes en présence de la plante thèse de MAGISTERE En Physique Option : Physique Energétique, Université El-Hadj Lakhdar – Batna. (2008).
étude expérimentale du bilan énergétique d'une serre tunnel à couverture de polyéthylène ,mémoire de magister ; université de Ouargla ,2010.
- [13]Andre, M; Marc, S. Livre: Physique de sol, France (1991).Baille A, INRA et les cultures sous serre. Vers l'utilisation rationnelle de l'énergie et la maîtrise des conditions climatiques/INRA (Paris-France)- 1995
- [14] Contribution à l'étude dynamique et thermique de l'air à l'intérieur d'une serre en verre de type Venlo dans les régions des Aurès; les hauts plateaux est d'Algérie (Etude de simulation). Thèse de doctorat de Science en Mécanique énergétique Université ElHadj Lakhdar Batna. (2010).
- [15] Etude des paramètres climatique, sous serre, chauffée en présence de la plante. thèse de MAGISTERE En Physique Option: Physique Energétique, Université ElHadj Lakhdar – Batna
- [16] Nisen, A.(1969).L'éclairément naturel des serres. NISEN, André. L'éclairément naturel des serres. J. Duculot, 1969. Presse Agronomique, Gembloux
- [17] Sinoquet,H.(1993).Modelling radiative transfer in heterogeneous canopies and intercropping Systems .In Crop structure and light microclimate,Characterisation and
- [18] ISSANCHOU, G. MONTEIL, C., , et AMOUROUX, M. Modèle énergétique de la serre agricole. Journal de Physique III, 1991, vol. 1, no 3, p. 429-454.

[19] LEBBAL CHIRINE. Etude de la convection sous serres fermées et ouvertes en présence de la plante thèse de MAGISTERE En Physique Option : Physique Energétique, Université El-Hadj Lakhdar – Batna. (2008).

[20] A. Clot, La Recherche, N° 76, pp. 213-223, 1977.

[21] M. Santamouris, A. Argiriou and M. Vallindras, Solar Energy, Vol. 52, N°5, pp. 371-378, 1994.

[23] H. El Mehiri, S. El Golli et M.T. Benkhelifa, J.I.TH., pp. 822-831, Alger, 1989.

[24] T. Boulard, Thèse de Doctorat, E.N.S.P. de Montpellier, France, 1996.

[25] B. Draoui, Thèse de Doctorat à l'Université de Nice, Sofia-Antipolis, France, 1994.