الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département du Génie Électrique et de l'Informatique



Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Génie Électrique

Option : Energies solaire et Eolienne.

THEME

Etude thermique d'une installation de réfrigération solaire.

Proposés et dirigés par :

Dr. Younse CHIBA

Préparés et présentés par :

Melle. Faiza MASKRI

Melle. Djamila CHERIET

Année Universitaire 2014-2015

Remerciement

Nous remercions tout d'abord ALLAH de nous avoir donné la force d'accomplir ce travail qui reflète nos efforts le long des années d'étude.

Nous tenons à exprimer nos gratitudes et vifs remerciements à notre promoteur, Monsieur ***Chiba Younse*** *nous avoir proposé et suivi ce sujet ainsi pour leurs orientations et précieux conseils pendant la durée de travail sur ce projet.*

Nos remerciements les plus sincères s'adressent également aux membres du jury, qui ont accepté de participer à la valorisation de ce travail.

Nous remercions également tous les enseignants du département génie électrique et tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin, directement ou indirectement à l'élaboration de ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à tous les étudiants du département science et technologie, notamment les étudiants de la ***2 éme Année Master SES,*** *pour leur esprit de groupe et leur solidarité.*

Faiza, Djamila.

Dédicace

Au nom d'Allah le Miséricordieux le très miséricordieux.

Je dédier ce modeste travail :

– A mes très chers parents : a ma chère mère ***Fatema****, pour sa bravoure et son amour sans cesse renouvelé, que ce présent soit le témoignage de ma reconnaissance et qu'il fasse l'objet de ma fierté, puisse dieu te permettre de jouir du produit de ton effort, je ne trouverai jamais les mots justes pour te remercier. A mon cher père* ***Mouhamed*** *je ne trouverai jamais les mots justes pour tes remercier ; Que Dieu les préserve.*

–A mes chères sœurs et mes chères frères ; Que je les aime beaucoup sans oublier toute ma grande famille

–A mes oncles et mes tantes.

– A les petits.

–A mon promoteur Mr ***CHIBA Younse***

– A mon binôme ***Djamila*** *et sa famille (****CHERIET****).*

– A tous mes intimes: Luiza Amouri– Fella– Marwa –Soumia, pour tous les moments vécus a leur cotés.

–A mes amies : Afaf– Hafidha–Razika–Lilia–HanenB–Ibtissam–Fatima zohra– Linda.

–Et je dédier spécialement à « Inar MG »

– Et tous mes amis qui étudient avec moi.

– A tous les enseignent et les étudiants d'université de ***Dr YAHIA Fares****, et tous qui connaisse* ***Faiza MASKRI****.*

Dédicace

Au nom d'Allah le Miséricordieux le très miséricordieux.

Je dédier ce modeste travail :

- A mes très chers parents : a ma chère mère ***Fatema****, pour sa bravoure et son amour sans cesse renouvelé, que ce présent soit le témoignage de ma reconnaissance et qu'il fasse l'objet de ma fierté, puisse dieu te permettre de jouir du produit de ton effort, je ne trouverai jamais les mots justes pour te remercier. A mon cher père* ***Mohamed****, que Dieu les préserve.*

-A mes chères sœurs {NAIMA} et mes chères frères {Hassan-Abd-elkader –Boujemea-morad et yousef} ; Que je les aime beaucoup sans oublier toute ma grande famille

- A mon promoteur Mr ***CHIBA Younse****.*

- A mon binôme ***Faiza*** *et sa famille (****MASKRI****)*

-A ma copine ALYAWI Malika.

- A tous mes intimes:Fella-Nadia-Rima-Marwa-Soumia -Rawia–Zahra-Nasira, Ilham, Khayra, pour tous les moments vécus a leur cotés.

- Et tous mes amis qui étudient avec moi.

- A tous les enseignent et les étudiants d'université de ***Dr YAHIA Fares****, et tous qui connaisse* ***djamila CHERIET****.*

ملخص :

يهدف هذا العمل الى دراسة حرارية لنظام التبريد بالامتصاص باستخدام الطاقة الشمسية والمائع التبريدي الأمونيا. كمية الطاقة التي ينتجها نظام الضغط الحراري يعتمد إلى حد كبير على الاشعة الشمسية الساقطة على سطح الالتقاط. لهذا الغرض، تم تطوير برنامج باستخدام الفورتران لتحديد الإشعاع الشمسي للموقع من خلال المحاكاة العددية لنموذج شبه تجريبي موجود في المراجع. وقد أجريت دراسة خصائصية تم من خلالها عرض نتائج المحاكاة العددية ومناقشتها من أجل توضيح السلوك الحراري لجهاز التبريد بالامتصاص.

كلمات المفتاح:

محاكاة عددية، امونيا، التبريد الشمسي، الامتصاص .

Résumé :

Le présent travail consiste à l'étude thermique d'une installation de réfrigération solaire par absorption à base de l'ammoniaque NH_3. La quantité d'énergie produite par le système de compression thermique dépend fortement, du rayonnement solaire incident sur la surface de captation. Un code de calcul à base du Fortran a été développé pour déterminer le gisement solaire de site considéré et ce, à travers la simulation numérique d'un modèle semi-empirique existant dans la littérature. Une étude paramétrique des différentes grandeurs de l'installation a été effectuée. Les résultats de la simulation numérique de réfrigération par absorption ont été présentés et discutés afin de clarifier le comportement thermo physique de l'installation.

Mots-clés :

Simulation numérique, NH_3, Réfrigération solaire, Absorption

Abstract :

This work consists on thermal study of solar refrigeration with absorption system based on ammonia NH3. The amount of energy produced by the thermal compression system is highly dependent, solar radiation incident on the collector Area. A source code based on Fortran has been developed to determine the solar radiation site considered through the numerical simulation of an existing semi-empirical model in the literature. A parametric study of different parameters of the installation has been effected. The results of the numerical simulation of absorption refrigeration were presented and discussed in order to clarify the thermo physical behavior of the installation.

Keywords:
Numerical simulation, NH3, Solar Refrigeration, Absorption

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Liste des figures ……...….I

Liste des tableaux……III

Liste des symboles……IV

Introduction générale……..….1

Chapitre I : gisement solaire.

I : Introduction…….....04

I .1 : définition…….....04

I.2 : une énergie de flux, diffuse et intermittente……....05

I. 3 : mouvement du globe terrestre…….08

I .4 : géométrie terre soleil……...08

I.4.1 : système de coordonnées terrestres……08

I.4.2 : système de coordonnées célestes ……10

a : système de coordonnées horizontales……...…….10

b : système de coordonnées horaires……...11

c : détermination des coordonnées solaires……...……..13

I.5 : les temps solaires…….....16

a : le temps solaire vrai… …….....16

b : le temps solaire moyen …….....16

c : équation de temps……..17

d : temps universel……...…...17

e: temps légal……..17

I.6: insolation…….……..17

I.6.1: mesure de l'insolation…….…….....18

I .7: modélisation du rayonnement solaire au sol…….…19

I.8: caractérisation du gisement solaire……...…….19

I.8.1 : grandeurs physiques, terminologies…….....19

I.8.2: instrumentation…….21

I.8.3.Potentiel solaire …….....23
-Influence de l'atmosphère…….……23
- Facteur de trouble de linke…….……..23
- rayonnement extraterrestre et indice de clarté…….....23
- description de l'algorithme description de l'algorithme pour calculé l'ensoleillement sur une surface inclinée ……..……....25
- calcule de l'ensoleillement horaire global et diffus……....26
- Calcul de l'ensoleillement sur un plan incliné ……...27
-calcule de l'ensoleillement horaire dans le plan du champ PV……...28
- sommation…….……..28
- rayonnement en Algérie……..……28
Conclusion…….…29
Chapitre II : Etat de l'art (machine frigorifique à absorption)
II.1: introduction……...….31
II.2 : production de froid naturel……..…..31
II.3 : Technologie de réfrigération solaire……...……...32
II.4: réfrigération solaire par sorption …….....33
II.5 : description du système solaire…….....33
II.5 .1 : les capteurs solaires…….....33
II.5 .1.a : les capteurs à air…….....34
II.5 .1.b : les capteurs plans……..……..34
II.4 .1.c : les capteurs à concentration fixes (cpc) ……35
II.4 .1.d : les capteurs sous vide…….....36
II-6 : procédé par absorption……..39
II.7 : Description du système de climatisation……...39
II.7.1: Capteur solaire…….....39
II.7.2: machines frigorifique à absorption……...……40
a: historique……..….41
b: la machine frigorifique à absorption :état de l'art…….42
b.1: machine à absorption classiques…….……42
b.2: machine à absorption alternative……...…..47
II.8: fluides de travail utilisé dans les cycles à absorption…….……...58
II.9:la machine frigorifique à absorption démixtion…….……61

II.10.1: principe de l'absorption …..……...…...64
II.10.2 :avantages et inconvénients des machines à absorption…….…...66
II.11:procédé par adsorption…….…...….66
II.11.1:Machine à adsorption……..……..……..67
a-Description de l'installation frigorifique solaire à adsorption 67
b-Principe de l'adsorption……..68
c-Avantages et inconvénients des machines à adsorption ……69
Conclusion……..…..…70

Chapitre III : modèle mathématique

III.1 : introduction……...72
III.2 : Paramètres géométriques et atmosphériques……..72
III.3 : modélisation du rayonnement solaire incident sur plan horizontal par (modèle r.sun)…….…74
III.4 : modélisation du rayonnement solaire incident sur plan quelconque Par ciel clair……....74
III-5- Rayonnement solaire incident sur un plan quelconque (Modèle r.sun)…..75
III.6 : Modélisions mathématiques pour calculer le paramètre de machine frigorifique a absorption…….....77
a-cycle frigorifique à absorption…….....77
b-machine frigorifique à absorption couplée au solaire thermique…..……79
b-1-Principe de fonctionnement ……..79
b-2-Modélisation …..……...……...…80
b-3-Diagramme d'Oldham…….……..82
b-4-Diagramme de Merkel …….....83
b-5-Mélanges pour une machine à absorption ……...…84
III-7-analogie entre un système de réfrigération à absorption et un système frigorifique à compression mécanique……..……...85
III-8-Comparaison entre deux systèmes de production de froid …….86
Conclusion…….……..…87

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV-1 : gisement solaire……..……....89
a : Les rayonnements solaires journalières ……..……..….....89
b : Evolution des rayonnements solaires annuels ……..……...90

IV-2 simulation numérique de cycle de l'ammoniaque ……...91
- Résultats et discutions……..91
Conclusion……...99
Conclusion générale …….…… 101
Bibliographie…….102

Liste des figures

Figure(I). 1:Distribution spectrale du rayonnement solaire. 05
Figure(I). 2:Les différents type de rayonnement. 06
Figure(I). 3:Disponible de l'énergie solaire. 07
Figure(I). 4:Mouvement du soleil pendent la journée. 07
Figure(I). 5:Variation saisonnière du rayonnement solaire. 08
Figure(I). 6:Les coordonnées géographiques. 09
Figure(I). 7:Longitudes et latitudes sur le globe. 09
Figure(I). 8: Hauteur et azimut pour un observateur dans l'hémisphère Nord 10
Figure(I). 9: Système de coordonnées horaires. 12
Figure(I). 10: La déclinaison du soleil en fonction des jours. 12
Figure(I). 11: Les coordonnées horaires 13
Figure(I). 12: Procédure de calcul des coordonnées horaires du soleil. 14
Figure(I). 13 : Organigramme de calcul le nombre de jours 15
Figure(I). 14: Les coordonnées horizontales. 14
Figure(I). 15: Héliographe Campbell-Stokes 18
Figure(I). 16 : Héliographe à fibre optique. 19
Figure(I). 17 : Pyrhéliomètre. 21
Figure(I). 18 : Pyranomètre. 22
Figure(I). 19 : Pyrradiomètre. 22
Figure(I). 20: Le rayonnement extraterrestre en fonction des jours. 24
Figure(I). 21: Schéma fonctionnel du calcul de l'ensoleillement sur une surface inclinée. 25
Figure(I). 22: Composantes du rayonnement global sur une surface inclinée. 27
Figure(I). 23: Rayonnement en Algérie (Longitude). 29
Figure(II). 01: Organigramme des différentes technologies de production de froid à partir de l'énergie solaire. 32
Figure(II). 02: Vue générale d'un capteur à air. 34
Figure(II). 03: Vue générale d'un capteur plan à eau. 35
Figure(II). 04: Vue générale d'un capteur CPC. 35
Figure(II). 05: Vue générale d'un capteur sous vide. 36
Figure(II). 06: Efficacité des différents capteurs solaires et applications aux différentes technologies de climatisation solaire. 38
Figure(II). 07: Schéma de machines frigorifique à absorption 40
Figure(II). 08: Cycle frigorifique à absorption à simple effet. 43
Figure(II). 09: Transformateur de chaleur à absorption. 44
Figure(II). 10 : Cycle frigorifique à absorption à double effet opérant à trois niveaux de pression : haute, modérée et basse. 45
Figure(II). 11: Cycle frigorifique à absorption à double effet opérant à deux niveaux de pression. 45
Figure(II). 12: Cycle frigorifique à absorption à triple effet opérant à quatre niveaux de pression. 46
Figure(II). 13 : Pompe à chaleur à absorption à opérations alternatives. 48
Figure(II). 14: Pompe à chaleur combinée absorption/compression. 49

Figure(II). 15: Le cycle combiné sorption-compression à double effet configuré comme une pompe à chaleur. 49
Figure(II). 16: Cycle combiné proposé par Caccoila et al. employant deux combinaisons de fluides : NH3/H2O et H2O/KOH. 50
Figure(II). 17: Le cycle à résorption proposé par Altenkirch utilisant deux circuits de solutions. . 51
Figure(II). 18: Cycle mixte à absorption fonctionnant avec l'énergie solaire et utilisant les couples (NH3/eau) et (eau/LiBr). 52
Figure(II). 19: Cycle frigorifique à double effet modifié : combinaison éjecteur-absorption (Absence du condenseur). 52
Figure(II). 20: Cycle combiné éjecteur-absorption utilisant le DMETEG/R21 comme fluide de travail. 53
Figure(II). 21: Cycle combiné éjecteur-absorption proposé par Aphornratana et al. 54
Figure(II). 22: Cycle combiné éjecteur-absorption proposé par Eames et Wu. 55
Figure(II). 23: Cycle à absorption osmotique- membrane. 56
Figure(II). 24: Cycle frigorifique à absorption par diffusion DAR. 58
Figure(II). 25: Schéma représentatif d'un réfrigérateur à absorption démixtion proposé par Sherwood. 62
Figure(II). 26: Schéma représentatif d'un réfrigérateur à absorption démixtion proposé par Mills en 1953. 62
Figure(II). 27: Schéma représentatif d'une pompe à absorption démixtion proposé par Mills en 1960. 63
Figure(II). 28: principe de l'absorption. 65
Figure(II). 29: Schéma descriptif de l'installation frigorifique solaire à adsorption. 68
Figure(II). 30: principe de l'adsorption. 69
Figure (III). 01 : Organigramme pour calculer la puissance totale du rayonnement absorbé par le capteur solaire. 76
Figure(III). 02 : Représentation schématique du cycle frigorifique à absorption en utilisant la séparation de phase (notant l'absence du condenseur). 77
Figure(III). 03 : Machine frigorifique à absorption couplé au capteur solaire. 79
Figure(III). 04 : Organigramme pour calculer le COP et le Q. 81
Figure(III). 05 : Diagramme d'Oldham pour le couple NH3-H2O. 82
Figure(III).06 : Diagramme de Merkel. 83
Figure(III). 07 : System de réfrigération à absorption thermique 85
Figure(III). 08 : System frigorifique à compression mécanique. 85
Figure(IV). 01 : variation du rayonnement solaire journalière. 89
Figure(IV). 02: variation du rayonnement solaire annuelle. 90
Figure(IV). 03 : Variation du COP en fonction des Températures d'absorption et de génération... 91
Figure(IV). 04 : Variation de Qe en fonction des Températures d'absorption et de génération. 92
Figure(IV).05 : Variation du COP en fonction des Températures de générateur et de l'absorption.93
Figure(IV). 06 : Variation de Qe en fonction des Températures de générateur et de l'absorption. 94
Figure(IV). 07: Variation du COP en fonction des températures d'évaporation et de génération... 95
Figure(IV). 08 : Variation de Qe en fonction des températures d'évaporation et de génération. 96
Figure(IV).09: Variation de COP en fonction des températures de condensation et de génération. 97
Figure(IV). 10 : Variation de Qe en fonction des températures de condensation et de génération.. 98

Liste de tableaux

Tableau(I). 1 : coefficients de trouble du ciel..... 23
Tableau (II) 2: Résumé de quelques travaux de recherches portant sur les fluides de travail..... 59
Tableau(III). 3 : Couples réfrigérant-absorbant pour les installations d'absorption. 84
Tableau(III). 4 : Comparaison entre deux installations de production de froid. 86

Nomenclature

Symbole

E : Energie de flux (J)
λ : Longueur d'onde (m)
V : Fréquence (Hz)
C : Vitesse de lumière (m/s)
γ: Longitude (degré)
Φ : Latitude (degré)
h : La hauteur angulaire
α : L'azimut (degré)
δ : La déclinaison (degré)
ω : L'angle horaire (degré)
N : Numéro de jour de l'année
TSV : Temps solaire vrai (heure)
TV : Temps universel (heure)
a_s : Azimut solaire (degré)
T_L : Facteur de trouble de linke
p_v : La pression partielle de vapeur (Pa)
h_0 : Le rayonnement extraterrestre sur une surface horizontale
$G_{sc}(I_0)$: La constant solaire (1367w /m^2)
K_T : La moyenne mensuelle de l'indice de clarté
H_d : La moyenne mensuelle de l'ensoleillement diffus quotidien
H : La moyenne mensuelle de l'ensoleillement global quotidien
H_b **:** La moyenne mensuelle de l'ensoleillement directe
$\boldsymbol{r_t}$ **:** Le rapport de valeur horaire sur le total quotidien de l'ensoleillement global
$\boldsymbol{r_d}$: Le rapport de valeur horaire sur le total quotidien de l'ensoleillement diffus
R_b : L'ensoleillement direct divisé par l'ensoleillement direct sur l'horizontal
η : rendement d'un capteur
T_m : La Température moyenne du capteur (°C)
T_{ext} : La température extérieure du capteur (°C)
T_a : La température ambiante dans l'environnement du capteur
W : La puissance de l'irradiation solaire mesurée dans le plan du capteur (W)
Cop : Coefficient de performance
Δt : L'effet thermique
m_A : Masse atmosphérique
δ_R : Epaisseur optique de l'atmosphère
Q_C : Puissance thermique au condense (w)
Q_a : Puissance thermique a absorbeur (w)
Q_g : Puissance thermique au bouiller (w)
h_i : L'enthalpie de fluide au point i (J/kg)
ω_s : Angle au coucher du soleil (°C)
IG (h,T_L) : Le rayonnement global(w /m^2)
IB^h : Le rayonnement direct sur un plan horizontal (w /m^2)
ID^h : Le rayonnement diffus sur un plan horizontal (w /m^2)

IB^i : Le rayonnement direct sur un plan quelconque (w /m^2)
ID^i : Le rayonnement diffus sur un plan quelconque (w /m^2)
ε : La correction de distance entre la terre et le soleil
G_0 : le rayonnement solaire extraterrestre (w /m^2)
Fd (h, T_L) : la fonction diffuse angulaire, fonction de la hauteur du soleil et du facteur de trouble T_L corrigé.
Ai : sont des coefficients dépendants uniquement du facteur de trouble T_L corrigé.
Trd (T_L) : la fonction de la transmittance diffuse. Elle est fonction uniquement du facteur T_L corrigé, et varie entre 0 et 0.3.

I_N : Le rayonnement direct normal.

$\delta^i(\beta)$: L'angle d'incidence (degré)

"Introduction générale"

Introduction générale

La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace s'est manifestée principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre. La grande préoccupation du monde actuel est d'atténuer cette pollution en essayant d'adapter les sources d'énergie classiques à des critères très sèvres et de développer d'autre alternatives mettant en valeur les différents formes des énergies renouvelable.

Les sources d'énergie renouvelable comme leur nom l'indique, il s'agit de sources qui se renouvellent et ne s'épuiseront donc jamais à l'échelle du temps humain .Les sources non renouvelables sont les énergies fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz dont les gisements limités peuvent être épuisés. Les sources renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse.

Trois facteurs militent en faveur des énergies renouvelables :

– la sauvegarde de l'environnement.

– l'épuisement inévitable des ressources (pétrole, gaz, ..) limitées de la planète.

– les considérations économiques (coût).

Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite et non polluant.

L'énergie solaire, Ce terme désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil, Par définition, les énergies dites renouvelables sont potentiellement inépuisables.

Actuellement, il existe deux voies d'utilisation de l'énergie solaire qui transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement et indirecte consistent à bien orienter les bâtiments par rapport au soleil ou à utiliser des matériaux spéciaux et des modèles architecturaux qui permettent d'exploiter l'énergie solaire.

Contrairement au solaire thermique qui transforme le rayonnement solaire en chaleur qui permettent de chauffer l'eau, et du refroidissement solaire.

La réfrigération solaire permet d'économiser certainement une quantité substantielle de la consommation d'énergie primaire. Cela réduit la production de dioxyde de carbone et les pics de consommation d'électricité en été, qui est un avantage important pour l'environnement et l'économie nationale.

Notre mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous décrivons les notions essentielles sur le gisement solaire à savoir les coordonnés célestes terrestres et horaire, le temps de base, le mouvement de la terre autour du soleil et les différents type de rayonnement.

Le second chapitre nous avons présenté les différents types de capteur utilisé ainsi les différents machines frigorifique à absorption et le fluide frigorigène utilisé dans le cycle.

Dans le chapitre troisième une modélisation mathématique a été effectuée pour calculé les rayonnements solaire, la quantité de chaleur sur chaque phase dans la machine et le coefficient de performance(COP) on utilisant un code calcul développé en Fortran

En fin, le dernier chapitre, nous présenterons les résultats de calcul et on termine notre mémoire par une conclusion générale.

"Chapitre I"

Gisement solaire

Chapitre I : Gisement solaire

I-1-Introduction :

La ressource de base la plus importante pour tous les potentiels énergétiques renouvelables est l'énergie solaire, c'est le rayonnement émis dans toutes les directions par le soleil, et que la terre reçoit à raison d'une puissance moyenne de 1,4 kW/m², pour une surface perpendiculaire à la direction terre-soleil. Ce flux solaire est atténué lors de la traversée de l'atmosphère par absorption ou diffusion, suivant les conditions météorologiques et la latitude du lieu au niveau du sol. Afin d'exploiter au mieux cette ressource énergétique et pour un bon dimensionnement des installations solaires, il est nécessaire de connaître la quantité de l'énergie solaire disponible à un endroit spécifique à chaque instant de la journée et de l'année. Pour cette raison, on a jugé nécessaire de présenter une notion générale sur les coordonnées célestes ainsi que le rayonnement solaire.

-Définition :

Le soleil est un réacteur à fusion nucléaire qui fonctionne depuis 5 milliards d'années .par un processus de transformation d'hydrogène en hélium, il émet ainsi d'énormes quantités d'énergie dans l'espace (sa puissance est estimée à63500 kW/m2).

Ces radiations s'échappent dans toutes les directions et voyagent à travers l'espace à la vitesse constante de 300000km à la seconde, dénommée vitesse de la lumière. Après avoir parcouru une distance d'environ 150 millions de kilomètres, l'irradiation solaire arrive à l'extérieur de l'atmosphère de la terre avec une puissance d'environ 1367W/m2. C'est ce qu'on appelle la constante solaire. La terre, une petite boule comparée au soleil, intercepte un si faible partie de l'énergie radiante du soleil que les rayons du soleil ainsi stoppés paraissent constituer un faisceau parallèle. Energie la plus abondante sur terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse, elle-même à l'origine des énergies fossiles. C'est l'ensemble de la vie sur terre qui dépend de cette source énergétique. Heureusement pour l'humanité, selon le soleil ne devrait pas s'éteindre avant 5 autres milliards d'années.

I-2 : Une énergie de flux, diffuse et intermittente :

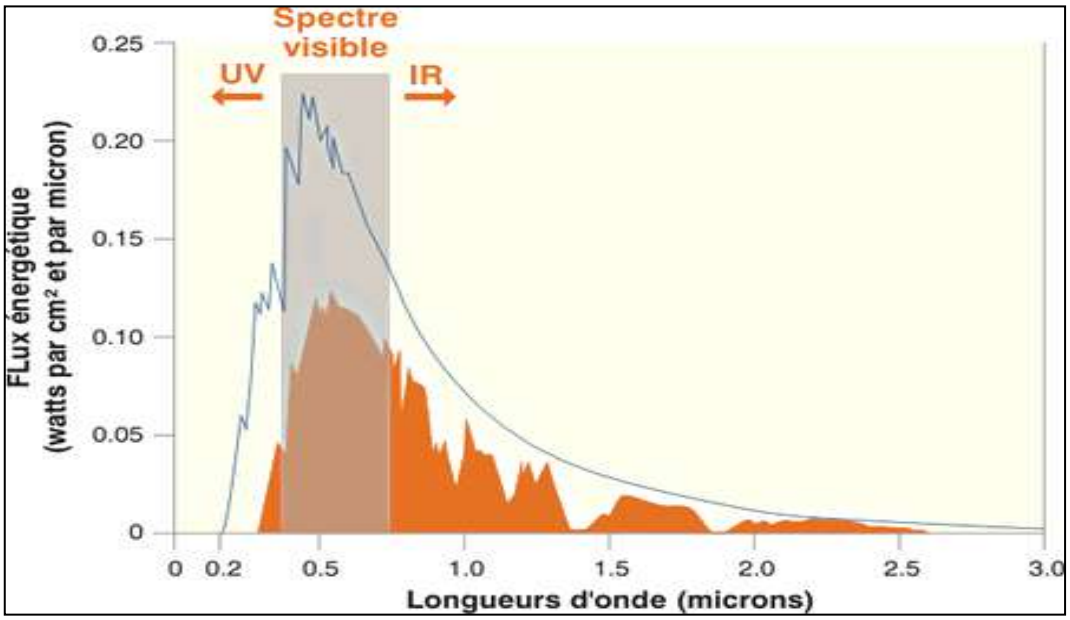
Les théories actuelles présentent le rayonnement solaire comme une émission de particules. Ce flux de particules, appelées photons, atteint la terre avec différentes longueurs d'ondes à la quelle correspond une énergie spécifique décrite par la relation :

$$E\,[J]=h.v=h\,.c/\,\lambda$$

Avec :

- λ : longueur d'onde [m].
- v : fréquence [Hz].
- C : vitesse de la lumière [m /s].

La répartition énergétique des différentes longueurs d'ondes du rayonnement électromagnétique du soleil est appelé spectre solaire.

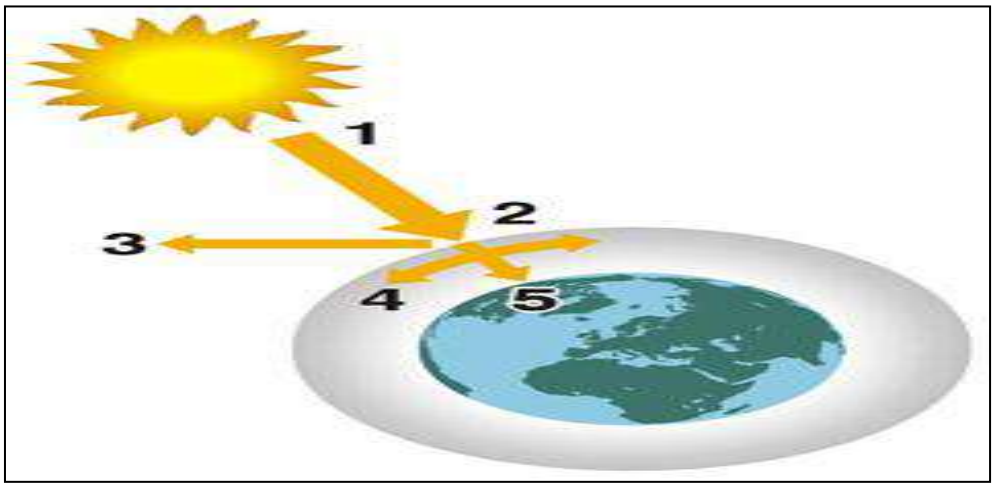


Figure(I). 1:Distribution spectrale du rayonnement solaire.

La lumière visible représente 46% de l'énergie totale émise par le soleil. 49% du rayonnement énergétique émis par le soleil se situe au-delà du rouge visible, dans l'infrarouge.

C'est ce rayonnement que nous ressentons comme une onde de chaleur. Le reste du rayonnement solaire, l'ultraviolet, représente l'ensemble des radiations de longueur d'onde à celle de l'extrémité violette du spectre visible.

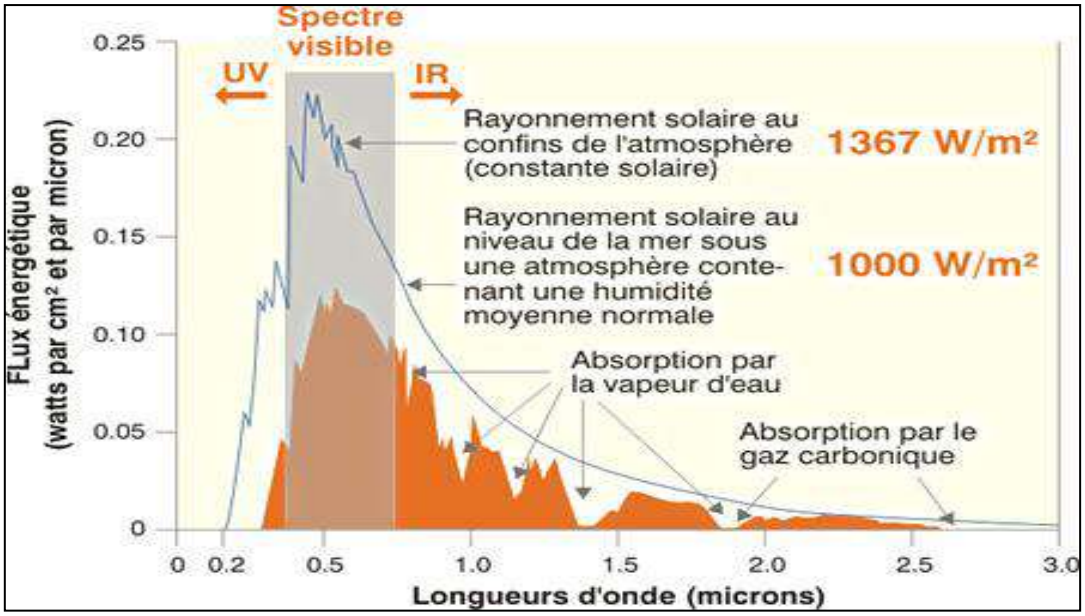
1. Puissance émise par le soleil : 63500KW/m^2.
2. Constante solaire : 1370W/m^2.
3. Rayonnement réfléchi.
4. Rayonnement absorbé et diffusé.
5. Rayonnement solaire à la surface de la terre (max : 1000 W/m^2).



Figure(I). 2:Les différents type de rayonnement solaire.

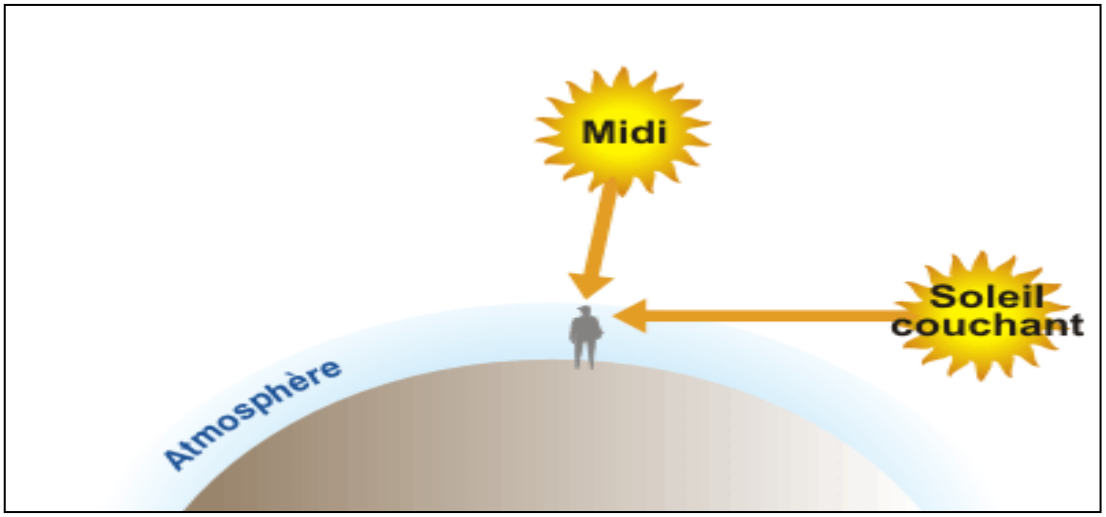
Au moins 35% du rayonnement solaire intercepté par la terre et son atmosphère sont réfléchis vers l'espace.

Une partie du rayonnement qui atteint la terre a été diffusée dans toutes les directions au cours de la traversée de l'atmosphère, en rencontrant des molécules d'air, des aérosols et des particules de poussière (c'est ce rayonnement diffus, appartenant notamment à la frange bleue du spectre visible qui est responsable de la couleur bleue du ciel clair). D'autre part, la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'ozone de l'atmosphère absorbent 10 à15 % du rayonnement solaire .Le reste du rayonnement atteint directement la surface de la terre.



Figure(I). 3:Disponible de l'énergie solaire.

Outre la composition de l'atmosphère, le facteur le plus important pour évaluer la quantité du rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre est l'épaisseur d'atmosphérique le rayonnement doit traverser.

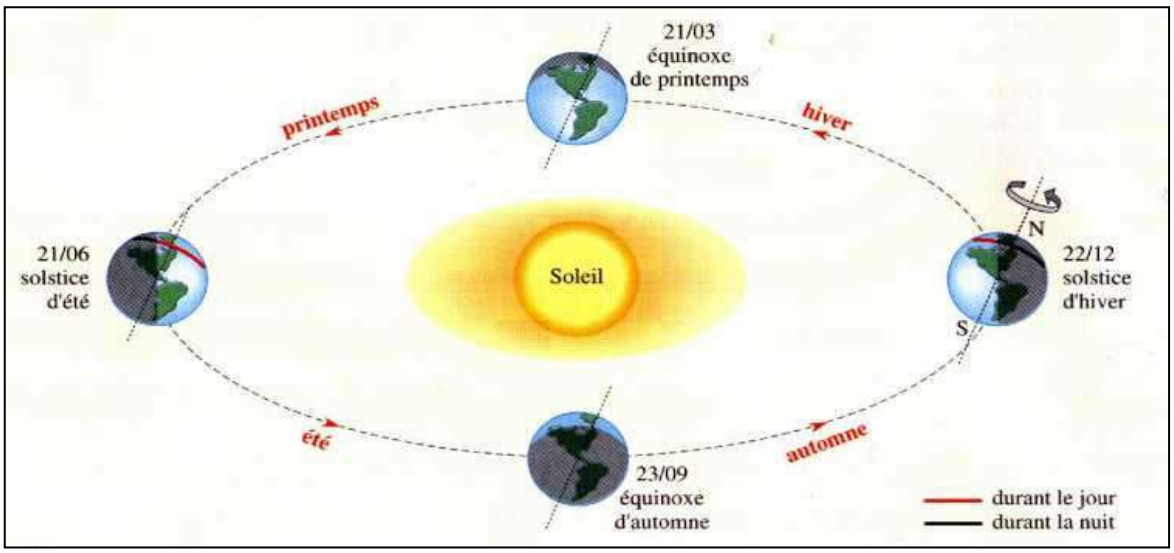


Figure(I). 4: Mouvement du soleil pendent la journée.

I-3 : Mouvement du Globe terrestre :

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi circulaire avec une période de 365,25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21décembre) que la terre est la plus proche du soleil, et au solstice d'été (22juin) qu'elle en est la plus éloignée.

La terre tourne sur elle-même avec une période de 24h.Son axe de rotation (l'axe des pôles) aune orientation fixe dans l'espace. Il fait un angle d=23°27 avec la normale au plan de l'écliptique.



Figure(I). 5:Variation saisonnière du rayonnement solaire.

I-4 Géométrie terre soleil :

I-4-1- Système de coordonnées terrestres :

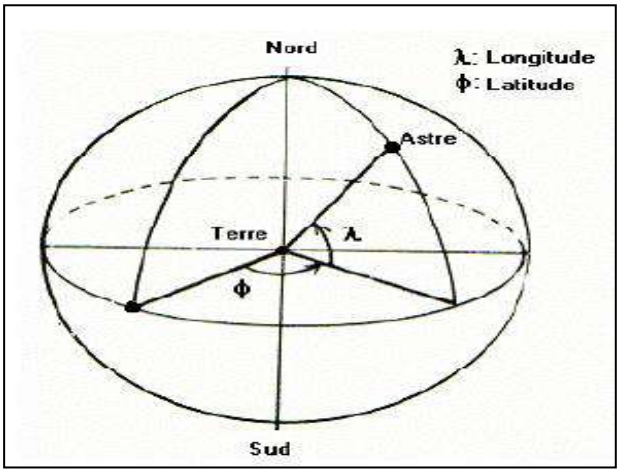
Tout point de la sphère terrestre peut être représenté par ses coordonnées terrestres que sont sa latitude et sa longitude. Ces coordonnées spécifient l'emplacement d'un point en utilisant l'équateur et la méridienne origine (celui de Greenwich en Angleterre) comme origines latitudinale et longitudinal, respectivement.

La latitude :

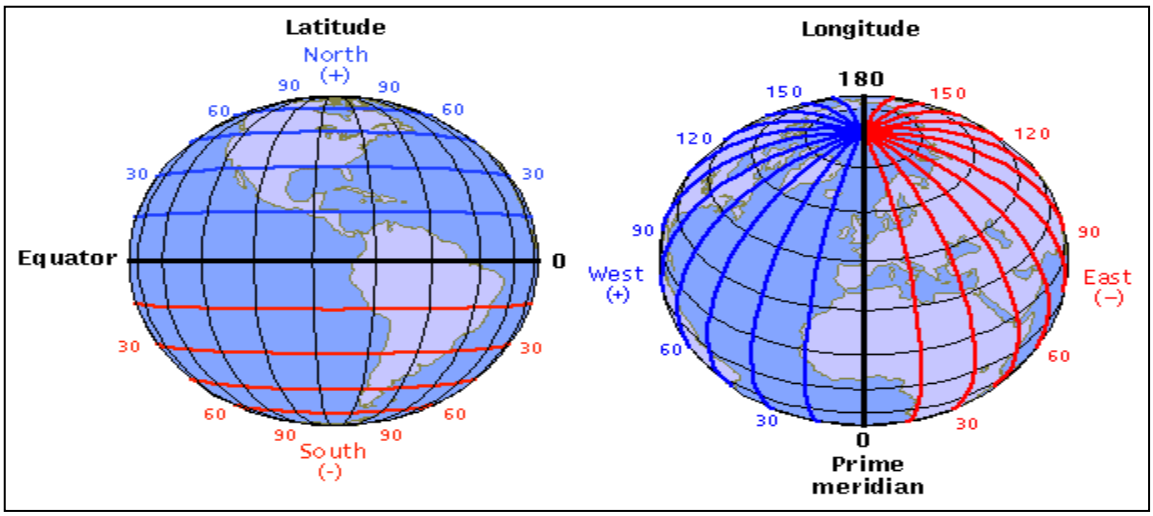
Est une valeur angulaire expriment le positionnement NORD-SUD d'un point par rapport à l'équateur. Cette grandeur s'étend de 0°à l'équateur jusqu'à90° aux pôles. On le considère comme positif dans l'hémisphère Nord, et négatif dans l'hémisphère sud.

La longitude :

Est une valeur angulaire expression du positionnement EST-OUEST d'un point par rapport au méridien de Greenwich. Cette grandeur à une étendue de -180°a+180°. Elle est négative à l'Ouest de la méridienne origine et positive à l'Est.



Figure(I). 6:Les coordonnées géographiques.



Figure(I). 7:Longitudes et latitudes sur le globe.

I-4-2- Système de coordonnées célestes :

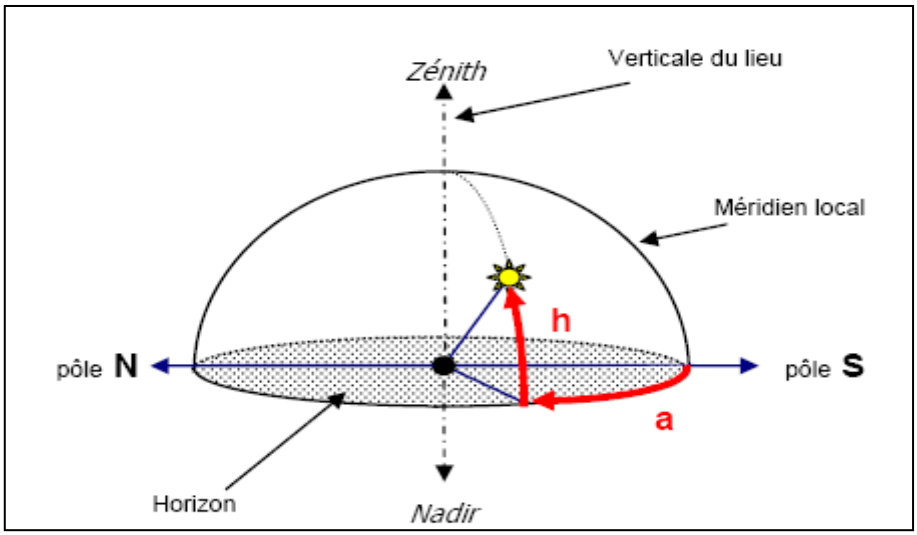
Il est possible de déterminer la position du soleil dans le ciel en utilisant un système de coordonnées céleste. Ces systèmes de coordonnées utilisent une grille de coordonnées projetées sur la sphère céleste (sphère imaginaire de rayon quelconque et dont le centre est occupé par la Terre).

En énergétique solaire on utilise couramment les coordonnées horizontales pour décrire la position du soleil. Cependant ces coordonnées ne sont pas calculées directement mais déduites des coordonnées horaires de l'astre solaire ; il est donc nécessaire de déterminer des relations permettant de passer des coordonnées horaires aux coordonnées horizontales.

a- Système de coordonnées horizontales :

Le système de coordonnées horizontales présente le mieux le ciel de l'observateur.

Il permet de définir la position du soleil dans un système de référence local constitué par le plan de l'horizon (perpendiculaire à l'axe vertical Zénith-Nadir du lieu) et le méridien du lieu



Figure(I). 8: Hauteur et azimut pour un observateur dans l'hémisphère Nord.

La hauteur angulaire (h) :

C'est l'angle compris entre le plan horizontal et l'axe « observateur – centre du disque solaire ». L'origine des hauteurs est fixée sur l'horizon, puis comptée de 0 à 90° en partant de l'horizon vers le zénith et de 0 à -90° du zénith vers l'horizon.

L'azimut (a) :

C'est l'angle formé par la projection de l'axe « observateur – centre du disque solaire » sur le plan horizontal et la direction Sud (pour l'hémisphère Nord) ou la direction Nord (pour l'hémisphère Sud).

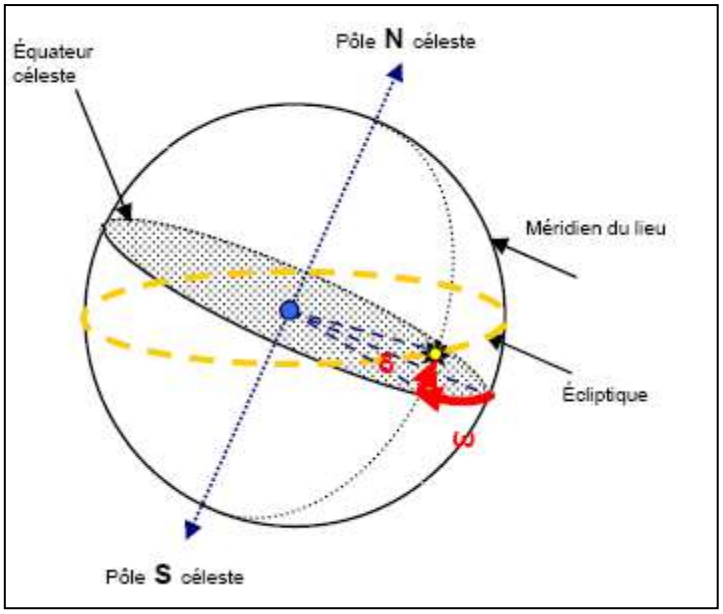
On le mesure sur le plan de l'horizon à partir du méridien de 0° à 360°, positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est.

Cependant le système horizontal présente l'inconvénient que les deux coordonnées varient de façon non uniforme en fonction du temps (en raison de la rotation de la Terre autour de l'axe des pôles) et en fonction du lieux d'observation (les calcul effectués en un lieu donné ne pourront pas être transposables directement en un autre lieu).

Les coordonnées horizontales sont donc aussi appelées coordonnées locales.

b- Système de coordonnées horaires :

Les coordonnées horaires permettent de définir la position du soleil dans un système de référence local, constitué par le plan de l'équateur céleste (qui est le prolongement de l'équateur terrestre sur la sphère céleste) et l'intersection du méridien du lieu avec ce plan

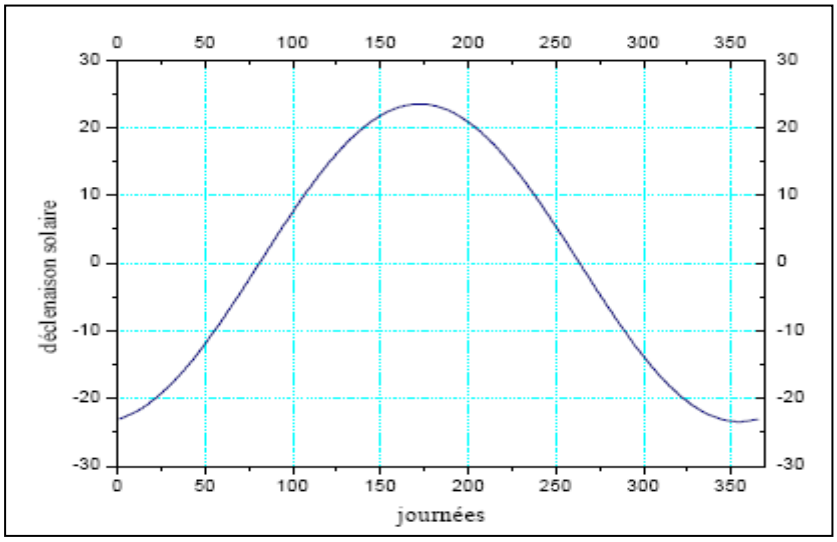


Figure(I). 9: Système de coordonnées horaires.

On définit alors les coordonnées suivantes :

La déclinaison (δ) :

C'est l'angle compris entre la direction Terre-Soleil et le plan de l'équateur céleste. La déclinaison varie de -23°27' au solstice e d'hiver à +23°27' au solstice d'été. Elle est nulle aux équinoxes.

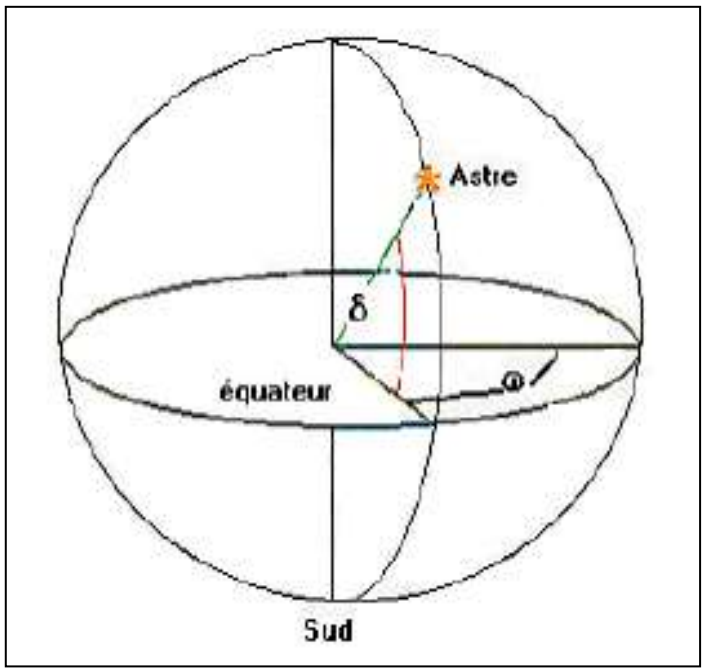


Figure(I). 10: La déclinaison du soleil en fonction des jours.

L'angle horaire(ω) :

Est l'angle que fait le plan contenant le cercle horaire (i.e. cercle passant par le soleil et dont le plan contient l'axe reliant les pôles Nord et Sud célestes) solaire avec le plan contenant le méridien céleste. Il est compté sur l'équateur négativement à l'Est (le matin) et positivement à l'Ouest (le soir).

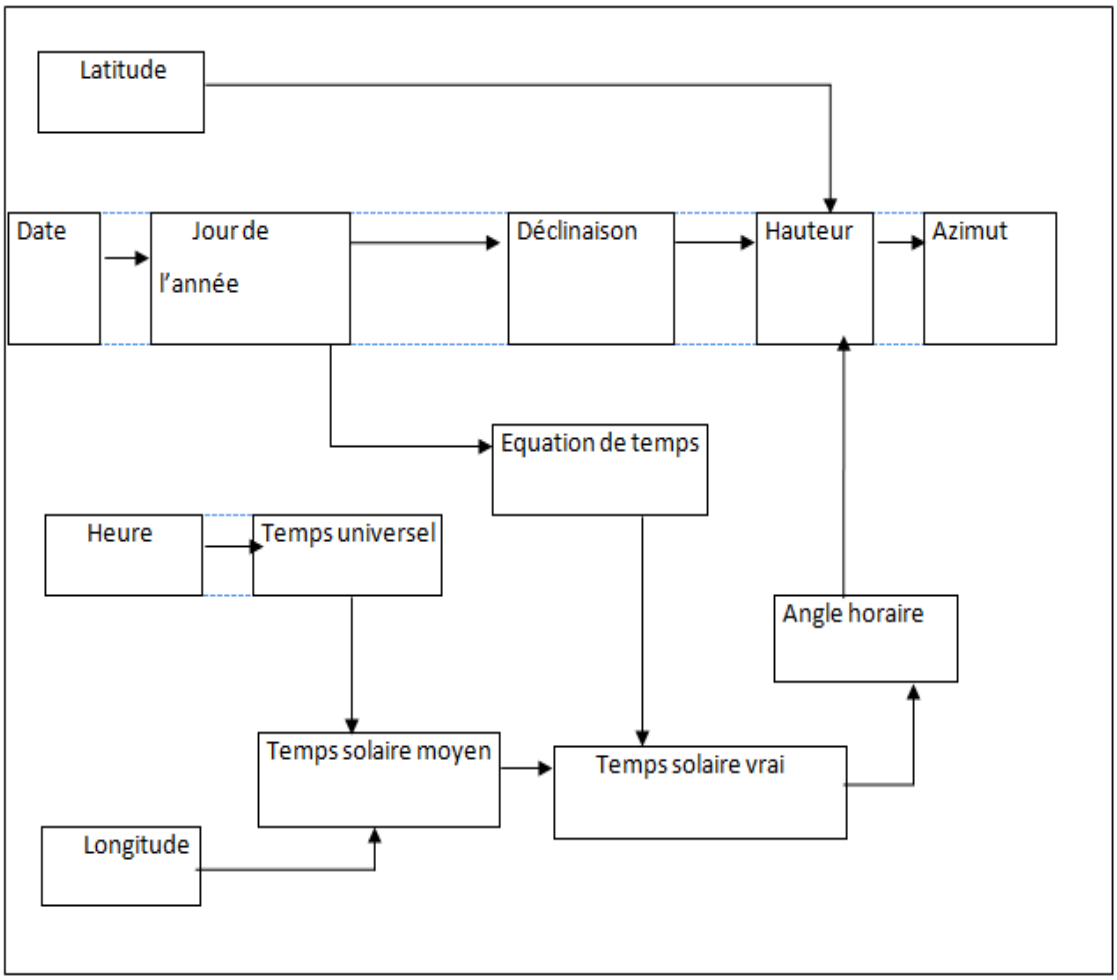
Le système de coordonnées horaires est aussi appelé coordonnées semi locales puisque l'angle horaire est dépendant du lieu d'observation contrairement à la déclinaison.



Figure(I). 11: Les coordonnées horaires.

c-Détermination des coordonnées solaires :

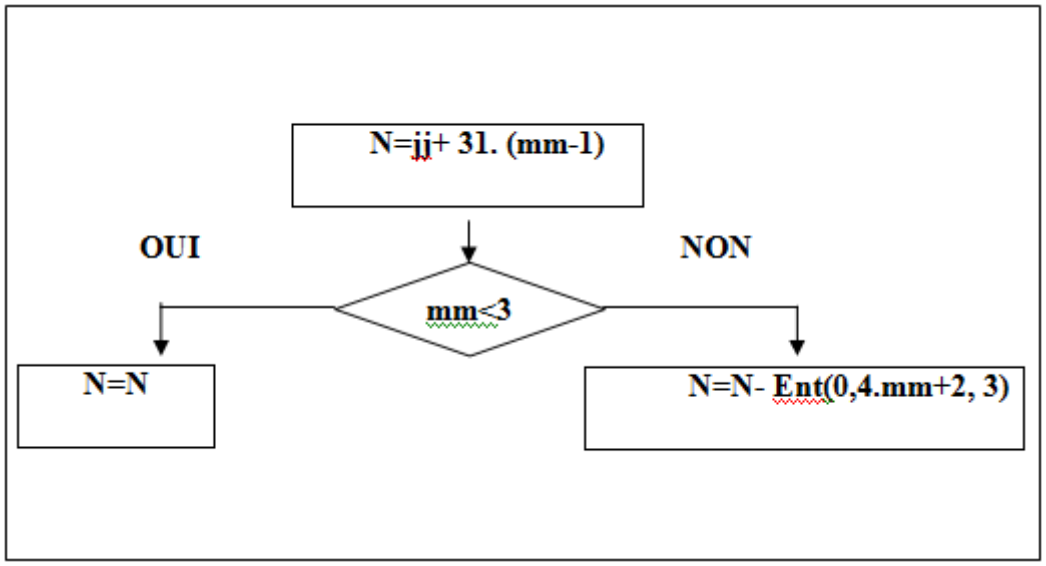
On considère ici un objet repéré sur terre par sa latitude φ et sa longitude L. pour une date de l'année jj/mm ainsi que l'heure l'égale du lieu HL, l'organigramme suivant décrit les étapes permettant de déterminer la position apparente du soleil dans un système de coordonnées horizontales à partir des données spatio-temporelle.



Figure(I). 12: Procédure de calcul des coordonnées horaires du soleil.

Les différentes formules énoncées ci-dessous sont des formules approchées mais suffisent pour la plupart des applications solaires.

- **Numéro de jour de l'année N :**



Figure(I). 13 : Organigramme de calcul le nombre de jours

- **Déclinaison**

$\delta=23{,}45.\sin(\beta)$ [°] Où $\beta=\frac{360}{365}$ (N-81) [°] …….... (I-1)

- **Angle horaire ω**

$\omega=$ (TSV-12).15 [°] (TSV en heures) ……..…… (I-2)

- **Temps solaire vrai**

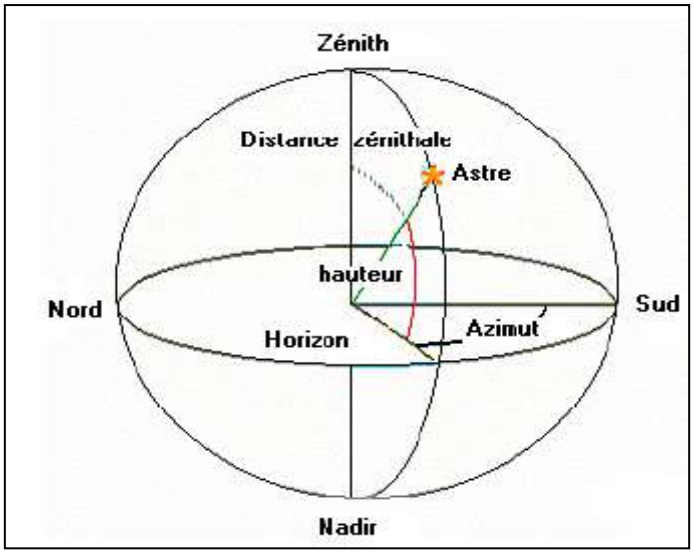
$TSV=TSM+\frac{ET}{60}$ [h] (TSM, TSV en heures ; ET en minutes) …. (I-3)

- **Temps universel**

$TU=HL-C_1$ [h] (HL,C_1 en heures) ……..... (I-4)

- **Azimut solaire a**

$a=\sin^{-1}(\frac{\cos(\delta).\sin(\omega)}{\cos(h)})$ (δ, ω, h en degrés) …….. (I-5)



Figure(I). 14: Les coordonnées horizontales.

I-5-Les temps solaires :

a- Le temps solaire vrai :

Le temps solaire vrai (TSV) est une mesure du temps chronologique, que l'on peut associer à tout point donné de la surface terrestre. C'est une grandeur locale directement liée à l'angle horaire du soleil mesuré en heures.

En physique, on prend, par commodité, TSV = 12h pour la valeur nulle de l'angle horaire (c'est-à-dire midi).

Le temps solaire vrai ne peut servir d'unité de temps car la durée entre deux culminations successives n'est pas constante d'un jour à l'autre de l'année pour des raisons géométriques (plan équatorial céleste incliné par rapport au plan de l'écliptique) et de mécanique céleste (la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du soleil n'est pas constante) ; On définit donc une échelle de temps véritable liée au TSV, le temps solaire moyen.

b- Le temps solaire moyen :

Le temps solaire moyen (TSM) local est l'angle horaire d'un soleil fictif, appelé « soleil moyen » et dont le mouvement apparent serait celui d'un cercle parcouru à vitesse constante. Cette hypothèse équivaut à faire tourner circulairement la Terre à vitesse uniforme autour d'un centre situé dans le plan équatorial céleste. Le temps solaire moyen varie de ± 16mn par rapport au temps solaire vrai.

c- Equation de temps :

L'équation de temps, est la différence entre le TSM et le TSV, elle varie en fonction de la date mais reste nulle en valeur moyenne [11]. Elle est définie de sorte que le TSM soit uniforme et les jours solaires moyens de durée invariable. Elle s'annule quatre fois par an :

- le 16 avril,
- le 14 juin,
- le 1er septembre,
- le 24 décembre.

Elle est maximale le 3 novembre, jour où elle vaut 16mn et 20 s.

d- Temps Universel :

On définit le temps universel (TU) comme étant le temps civil de Greenwich.

e- Temps légal :

[28] La convention internationale de 1911 a divisé la Terre en 24 fuseaux horaires de 15° de longitude chacun. L'heure est la même à l'in térieur de chaque fuseau.

Les fuseaux sont numérotés de 0 à 23 en allant vers l'Est et disposés de telle sorte que le fuseau 0 passe par Greenwich. En principe, chaque pays signataire adopte l'heure du fuseau qui contient sa capitale (sauf les pays très étendus).

I-6- Insolation :

L'insolation est l'exposition d'un objet au rayonnement solaire direct. Cette exposition est correctement révélée lorsque que le rayonnement solaire est suffisant pour créer une ombre portée bien nette.

Permet de calcul la durée maximale théorique d'insolation, cette durée théorique évolue naturellement au cours de l'année avec le cycle des saisons.

D'un point de vue géographique, la durée d'insolation est principalement modulée par l'altitude et le relief dans le lieu considéré, en effet, un site sur un sommet aura plus d'ensoleillement qu'un site au fond d'une vallée encaissée. On peut donc définir une durée géographique maximale d'insolation.

D'un point de vue effectif, la nébulosité, l'évolution aléatoire de la voûte nuageuse a pour conséquence que la durée d'insolation réelle au lieu considéré est inférieure ou très

rarement égale à la durée géographique d'insolation. Le rapport entre la durée d'insolation effective et la durée maximale théorique est appelé fraction d'insolation.

I-6-1- Mesure de l'insolation :

La mesure de la durée d'insolation journalière en un point de la surface terrestre se fait à l'aide d'un héliographe. Ces instruments peuvent être statiques ou dynamiques, on peut citer

- Héliographe Campbell-Stokes :

Une sphère de verre focalise les rayons solaires sur une bande de carton spécial qui se décolore ou brûle lorsque le rayonnement direct est supérieur ou égal à 120W/m². La durée d'insolation sera déterminée à partir de la longueur de carton marquée.



Figure(I). 15: Héliographe Campbell-Stokes

- Héliographe à fibre optique

L'extrémité de la fibre optique tourne sur l'axe du soleil. Elle est équipée d'un diaphragme pour minimiser l'influence du rayonnement diffus. A l'autre extrémité se trouve un photo détecteur au silicium précis, compensé en température.



Figure(I). 16 : Héliographe à fibre optique.

Il reçoit des impulsions lumineuses à chaque passage devant le soleil. Le détecteur délivre un signal analogique proportionnel à l'intensité du rayonnement, lorsque l'intensité dépasse 120 W/m².

I-7- Modélisation du rayonnement solaire au sol :

La connaissance des mouvements et des positions du soleil pour un observateur terrestre, permet de mettre à jour les principales spécificités d'ensoleillement et de ressources solaires d'un site ; en effet l'énergie solaire atteignant une surface donnée dépend directement de l'orientation de celle-ci et de la position du soleil. Pour récupérer un maximum d'énergie solaire, il est donc nécessaire de connaître la position du soleil au cours du temps afin d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La démarche développée ci-dessous réside en la présentation d'éléments de modélisation du rayonnement solaire instantané sur une surface quelconque.

I-8- Caractérisation du gisement solaire :

I-8-1- Grandeurs physiques, terminologies :

- Rayonnement solaire :

Le rayonnement émis par le soleil constitue un spectre continu allant des ultraviolets à l'infrarouge en passant par le visible où il émet le maximum d'énergie.

L'énergie atteignant une surface plane normale aux rayons solaires dans les couches supérieures de l'atmosphère varie peu au cours de l'année et définie la constante solaire égale à 1353 W/m².

Cependant, au sol l'énergie reçue est plus faible du fait de l'atténuation de du rayonnement à la traversée de l'atmosphère qui réfléchit, absorbe ou diffuse des parties de ce rayonnement. Cette atténuation est complexe et aléatoire puisque directement liée à la météorologie du lieu d'étude.

On peut distinguer plusieurs composantes du rayonnement au sol :

- Le rayonnement direct qui arrive sur la surface terrestre sans avoir subi aucune diffusion en traversant l'atmosphère.
- Le rayonnement diffus issu de la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols).
- L'albédo, rayonnement réfléchi par l'environnement proche (à prendre en compte notamment pour des surfaces inclinées).

La somme de ses rayonnements est le rayonnement global, de l'ordre du kW/m² par ciel dégagé].

- Eclairement solaire :

L'éclairement correspond à la densité de puissance parvenant à une surface réceptrice sous forme de rayonnement solaire. On peut distinguer l'apport énergétique du au rayonnement solaire direct (éclairement direct) et celui du au rayonnement solaire diffus ou réfléchi par l'environnement proche (éclairement diffus).

La somme de ces contributions forme l'éclairement global mesuré à chaque instant en W/m².

On considère que la production de telles ombres est possible lorsque l'éclairement de l'objet par le Soleil a une valeur au moins égale à 120 watts par mètre carré, ce qui permet de déterminer à chaque instant s'il y a ou non insolation.

On peut définir alors la durée d'insolation comme étant la somme des intervalles de temps durant lesquels un objet fixe est soumis à insolation, on considère cette durée comme égalant un jour entier soit année.

D'un point de vue astronomique, connaissant la latitude et la longitude du lieu, la différence entre les heures de coucher et de lever du bord supérieur du soleil.

I-8-2- Instrumentation :

- Mesure du rayonnement :

La mesure de l'énergie du rayonnement solaire se fait grâce à des capteurs qualifiés d'actinomètres et qui se répartissent selon les familles suivantes :

- **Pyrhéliomètre :**

Pointés en permanence vers le soleil, il mesure le rayonnement solaire direct. Ici, une thermopile (thermocouples montés en série, exposés au rayonnement solaire et dont les soudures froides sont maintenues à la température de l'air par conduction) délivre une différence de potentiel proportionnelle au flux incident.

L'appareil est muni d'un collimateur limitant rayonnement incident au rayonnement solaire direct et au rayonnement provenant du ciel circum solaire.



Figure(I). 17 : Pyrhéliomètre.

- **Pyranomètre :**

Mesure le rayonnement global. Pour pourvoir mesurer le rayonnement diffus uniquement, il est possible d'équiper le capteur d'une bande pare-soleil. L'élément sensible est aussi une thermopile (thermocouples montés en série, exposés au rayonnement solaire et dont les soudures froides sont maintenues à la température de l'air par conduction) qui délivre une différence de potentiel proportionnelle au flux incident.



Figure(I). 18 : Pyranomètre.

- **Pyrradiomètre :**

Mesure le rayonnement total reçu par une surface plane horizontale, depuis toutes les directions : ce rayonnement intègre le rayonnement solaire (direct, diffus et réfléchi vers le haut) et les rayonnements infrarouges en provenance de l'atmosphère et de la surface terrestre.



Figure(I). 19 : Pyrradiomètre.

I-8-3 -Potentiel solaire :

- Influence de L'atmosphère :

L'atmosphère de par sa composition joue le rôle de filtre naturel, atténuant le rayonnement solaire. Ce phénomène est complexe et aléatoire, avant d'atteindre le sol, les rayons solaire subissent de nombreuses interactions durant leur parcours dans la couche atmosphérique ils sont principalement absorbés et diffusés par les particules gazeuses, liquides et solides situées à diverses altitudes.

- facteur de trouble de linke :

Le facteur de trouble de linke est un paramètre permettant une estimation qualitative de l'atmosphère par rapport aux constituants généralement variables qui la compose (vapeur d'eau, aérosols).Il renseigne sur l'état de clarté de l'atmosphère dans tout le spectre du rayonnement solaire direct parvenant au sol.

La valeur de ce paramètre est donnée par :

$$T_{L=2.4+14.6\beta+0.4.(1+2\beta).\ln(p_v)} \quad \text{.....} \quad \text{(I-6)}$$

β : est le coefficient de trouble atmosphérique que l'on peut considérer comme égale à :

β=0.05	Zone rurale
β=0.1	Zone urbaine
β=0.2	Zone industrielle, polluée

Tableau(I). 1 : coefficients de trouble du ciel.

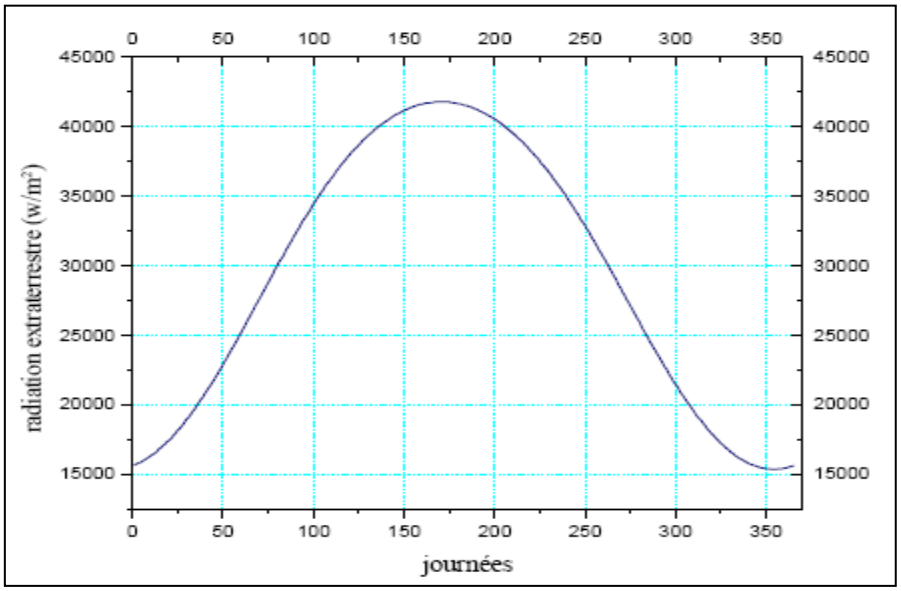
Et p_v la pression partielle de vapeur d'eau en mm hg.

- rayonnement extraterrestre et indice de clarté :

Le rayonnement extraterrestre est le rayonnement solaire avant qu'il n'atteigne la couche atmosphérique. Le rayonnement extraterrestre sur une surface horizontale H_0, pour le jour n, est obtenu à l'aide de l'équation suivant :

$$H_0 = \frac{86400 G_{sc}}{\pi}\left(1+0.033*\cos(2\pi*\frac{n}{365})\right)\left(\cos\varphi\cos\delta\sin\omega_s\sin\phi\sin\delta\right) \quad \text{..... (I-7)}$$

Où G_{SC} est la constante solaire égale à 1367W/m^2 et où les autres variables ont été définies plus haut. Avant d'atteindre le sol, le rayonnement solaire est atténue par l'atmosphère et les nuages.



Figure(I). 20: La moyenne d'iradiation extraterrestre en fonction des jours [4].

Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté (traduction littérale de l'américain clearness index). La moyenne mensuelle de l'indice de clarté, K T, est définie par :

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad \text{..... (I-8)}$$

Où $\bar{H}$ est la moyenne mensuelle de rayonnement solaire quotidien sur un plan horizontal, et $\bar{H}_0$ est la moyenne mensuelle du rayonnement extraterrestre sur la même surface horizontale.

Les valeurs de $\bar{K}_T$ varient selon les endroits et les saisons et varient généralement entre 0,3 (pour des régions ou des saisons pluvieuses) et 0,8 (pour des régions ou des climats secs et ensoleillés).

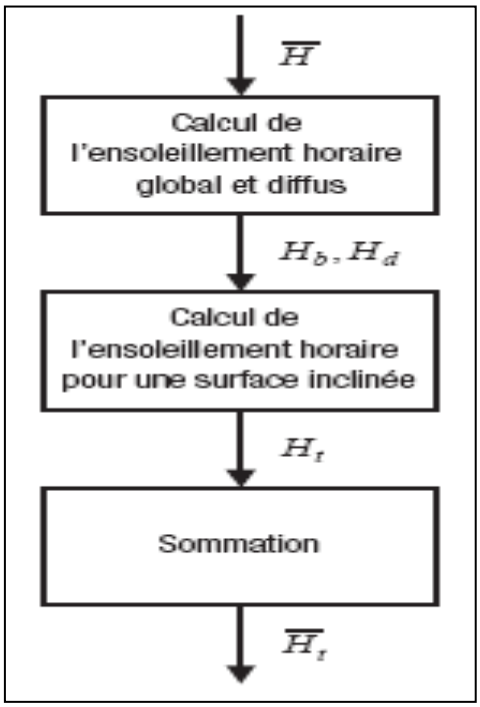
- description de l'algorithme pour calculé l'ensoleillement sur une surface inclinée :

L'algorithme peut être décrit comme une succession de trois étapes :

✓ Calcul des ensoleillements horaire global et diffus sur une surface horizontale pour toutes les heures d'une << journée moyenne>> ayant le même ensoleillement global quotidien que la moyenne mensuelle.

✓ Calcul des valeurs horaire de l'ensoleillement global sur la surface inclinée (ou suiveuse) pour toutes les heures de la journée ; et enfin,

✓ Sommation de ces valeurs horaires sur la surface inclinée pour obtenir l'ensoleillement quotidien moyen sur la surface du champ PV.



Figure(I). 21: Schéma fonctionnel du calcul de l'ensoleillement sur une surface inclinée.

- Calcul de l'ensoleillement horaire global et diffus :

Le rayonnement solaire peut être séparé en deux composantes : l'ensoleillement direct, émis par le disque solaire et l'ensoleillement diffus émis par le reste de la voûte céleste. L'algorithme de calcul sur une surface inclinée nécessite la connaissance des ensoleillements direct et diffus pour chaque heure d'une <<journée moyenne>> (pour le concept de journée moyenne, voir Duffie et Beckman, 1991).

En premier lieu, il convient donc de calculer la moyenne mensuelle de l'ensoleillement diffus quotidien Hd à partir de la moyenne mensuelle de l'ensoleillement global quotidien H et en utilisant la corrélation d'Erbs et coll.3 (Duffie et Beckman, 1991) :

$$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 1,391 - 3,560\overline{K}_T + 4,189\overline{K}_T^2 - 2,137\overline{K}_T^3 \qquad \text{…. (I-9)}$$

Quand l'angle horaire du soleil à son coucher pour le jour moyen du mois est inférieur à 81,4° et :

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 1,311 - 3,022\overline{K}_T + 3,427\overline{K}_T^2 - 1,821\overline{K}_T^3 \qquad \text{…. (I-10)}$$

Ensuite, l'ensoleillement quotidien moyen est réparti en valeurs horaires. Cela est réalisé grâce aux formules de collares-pereira et Rabl pour l'ensoleillement global :

$$r_t = \frac{\pi}{24}(a + b\cos w)\frac{\cos w - \cos w_s}{\sin w_s - w_s\cos w_s} \qquad \text{…. (I-11)}$$

$$a = 0,409 + 0,5016\sin\left(w_s - \frac{\pi}{3}\right) \qquad \text{…. (I-12)}$$

$$b = 0,6609 - 0,4767\sin\left(w_s - \frac{\pi}{3}\right) \qquad \text{…. (I-13)}$$

Où rt est le rapport de la valeur horaire sur le total quotidien de l'ensoleillement global, ws est l'angle horaire du soleil à son coucher exprimé en radians et w est l'angle horaire du soleil pour le milieu de l'heure pour laquelle le calcul est fait, exprimé aussi en radians et avec la formule de Liu et Jordan pour l'ensoleillement diffus :

$$r_d = \frac{\pi}{24}\frac{\cos w - \cos w_s}{\sin w_s - w_s\cos w_s} \qquad \text{…. (I-14)}$$

Où rd est le rapport de la valeur horaire sur le total quotidien de l'ensoleillement diffus. Pour chaque heure de la <<journée moyenne>>, H (ensoleillement global horizontal), Hd et Hb (ses composantes diffus et directe) sont données par les trois formules suivantes :

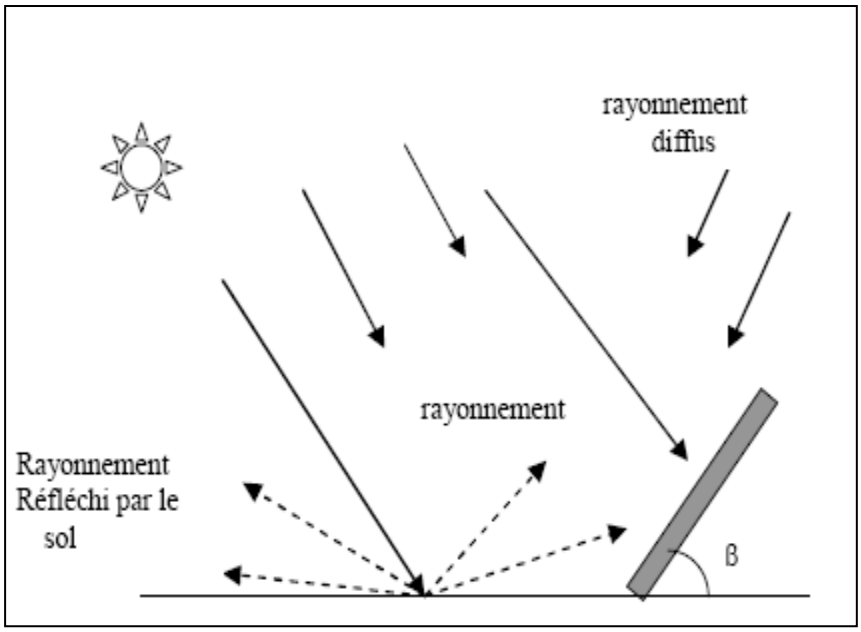
$$H = r_t \bar{H} \quad \text{…. (I-15)}$$

$$H_d = r_d \bar{H}_d \quad \text{…. (I-16)}$$

$$H_b = H - H_d \quad \text{…. (I-17)}$$

- Calcul de l'ensoleillement sur un plan incliné :

Le calcul de l'ensoleillement sur la surface d'un champ PV se fait en utilisant une méthode similaire à celle de l'algorithme de Klein et theilacker (duffie et Beckmann, 1991, section2.20). Cependant, l'algorithme a été étendu au cas des systèmes avec suivi du soleil et, pour cette raison, il est programmé d'une manière légèrement différente que celle décrite par duffie et Beckmann (1991).



Figure(I). 22: Composantes du rayonnement global sur une surface inclinée.

- Calcul de l'ensoleillement horaire dans le plan du champ PV :

L'ensoleillement horaire dans le plan du champ PV, Ht, est obtenu en utilisant un modèle isotrope simple, décrit dans la section 2.15 du manuel de duffie et Beckmann (1991). Ce n'est pas le modèle disponible le plus précis mais il est suffisant pour une étude de préfaisabilité :

$$H_{t=}H_{\ b}R_b + H_d\left(\frac{1+COS\beta}{2}\right) + H_\rho\left(\frac{1-cos\beta}{2}\right) \quad \text{…….. (I-18)}$$

Où ρ représente le coefficient de réflexion de lumière diffuse du sol (aussi appelé albédo du sol) et β l'inclinaison du champ PV. L'albédo du sol a été fixe à 0,2 si la température moyenne mensuelle est supérieure à 0°C, et une valeur de 0,7 si elle est inférieur à -5°C (une interpolation linéaire est faite pour les températures comprises entre ces deux valeurs).

Rb est l'ensoleillement direct sur le champ PV divisé par l'ensoleillement direct sur l'horizontale :

$$\mathbf{R_{b=}\frac{cos\theta}{cos\theta_z}} \quad \text{…… (I-19)}$$

Où θ est l'angle d'incidence de l'ensoleillement direct sur le champ PV et θz est l'angle zénithal du soleil.

- Sommation :

L'ensoleillement sur le plan incliné est calculé pour toutes les heures de la journée.

Le total quotidien Ht est alors obtenu par la sommation de ces valeurs horaires.

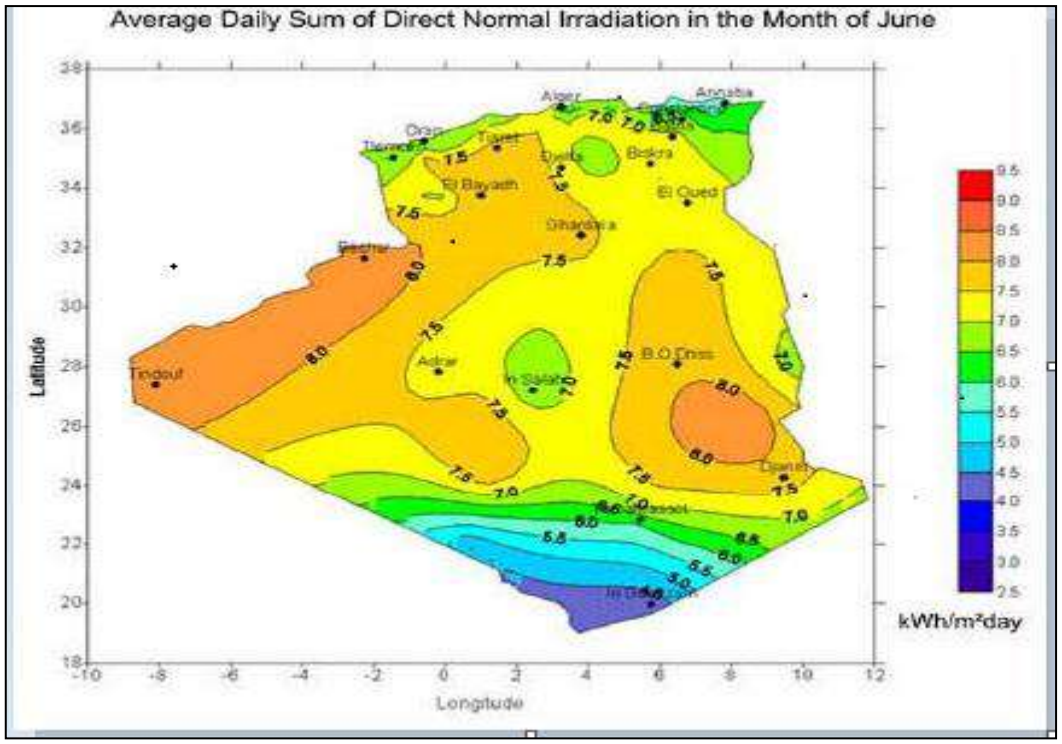
L'algorithme n'est pas valable pour les mois proches de la nuit polaire. Dans ce cas-là, l'ensoleillement sur le plan incliné est considéré égal à l'ensoleillement global horizontal.

- Rayonnement en Algérie :

L'Algérie possédant un gisement solaire important, de part son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ 1Kw/m^2.

L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de juillet) dépasse les 6Kwh/m2 et l'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de 2500 KWh/m^2.

La carte ci-dessous représente les différentes zones énergétiques de l'Algérie.



Figure(I). 23: Rayonnement en Algérie (Longitude).

Conclusion :

L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue d'une installation d'un système de captation solaire.

Le rayonnement reçu par un capteur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil.

Pour que le rayonnement solaire soit perpendiculaire au panneau solaire, et afin d'optimiser

Tout le système de captation, il est nécessaire de recourir à la technique de poursuite du soleil.

"Chapitre II"

Etat de l'art : (machine frigorifique à absorption)

Chapitre II : Etat de l'art (machine frigorifique à absorption)

II-1 Introduction :

Produire des frigories avec des calories est séduisant, surtout quand la source de chaleur utilisée est "gratuite" comme c'est le cas de l'énergie solaire.

L'idée n'est pas nouvelle car dès 1956 F. TROMBE et M. FOEX travaillaient dans cette voie .Mais ce n'est que depuis quelques années que s'affirme réellement la volonté de développer les filières de réfrigération solaire.

En ce qui concerne les premiers, la consommation de l'ensemble des machines frigorifiques est loin d'être négligeable. Par exemple pour la France en 1978, elle représente 5 % de la consommation totale d'électricité. .Aussi, les systèmes de climatisation ou de réfrigération solaires pourraient sans aucun doute contribuer à une économie substantielle d'énergie.

Le système frigorifique à énergie solaire étudié ici est destiné aux zones très isolées, où les difficultés de communication ne permettent pas de garantir l'alimentation en carburant ou en électricité.

L'installation frigorifique est l'ensemble des composants avec les quels une machine de production de froid fonctionne, elle englobe les systèmes d'échange de chaleur, les différentes sources d'énergie...etc.

Les installations frigorifiques à absorption travaillent avec l'énergie thermique.

Elles utilisent le principe selon lequel les liquides s'évaporent plus tôt à des températures basses si la pression baisse.

II-2-Production de froid naturel :

L'homme s'est rapidement rendu compte que les denrées périssables pouvaient être mieux conservées en hiver qu'en été, d'où l'idée d'utiliser du froid par le biais de la production de la glace, de manière naturelle sans l'usage de machines.

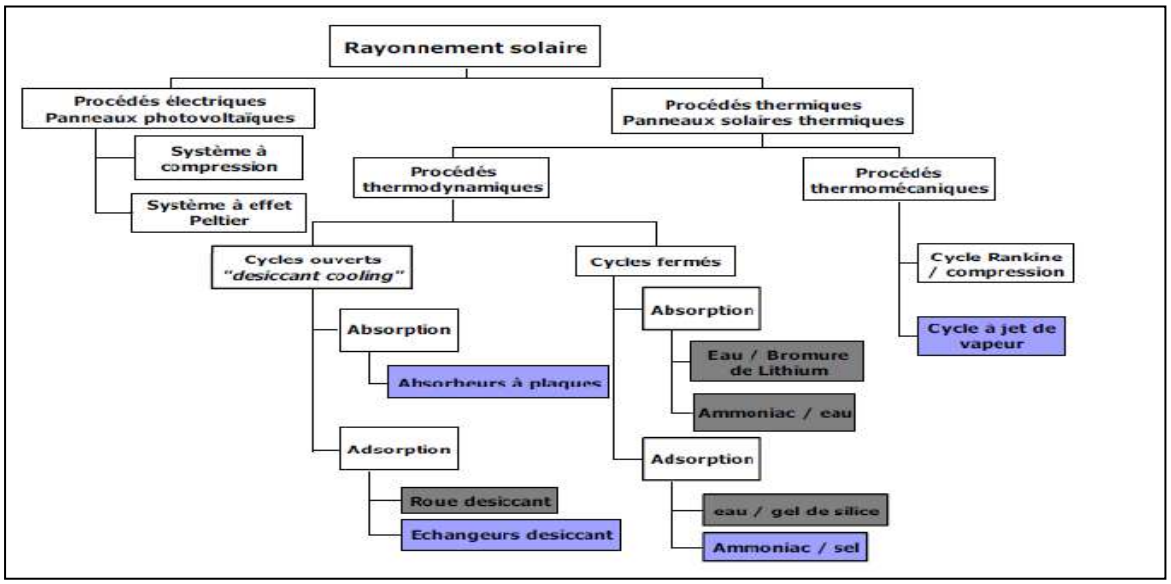
Cette glace était généralement ramenée de régions froides ou à forte gelée en hiver et conservée dans des glacières dont les parois sont thermiquement isolantes. Le fait de constater que le mélange de certains sels avec l'eau abaisse notablement la température, a aussi permis d'entrevoir des possibilités de production de froid.

Toutes ces idées simples et naturelles, accompagnées de l'approfondissement des connaissances en thermodynamique pour la production de la chaleur et du froid ont encouragé la mise au point des premières machines frigorifiques

Avant d'entamer notre travail on débute par cette partie qui est une préface sur les techniques de la production du froid à partir de l'énergie solaire, en se basant sur les systèmes de réfrigération à absorption.

II-3- Technologie de réfrigération solaire :

Il existe plusieurs voies d'utilisation de l'énergie solaire pour produire du froid. On peut les répertorier dans deux types de procédés principaux. La première est basée sur l'emploi de l'électricité en utilisant des panneaux photovoltaïques, la deuxième sur l'utilisation d'un procédé thermique (les panneaux photo-thermiques). Toutes les techniques utilisées sont listées dans la Figure(II).1, en bleu les technologies actuellement en test à l'échelle réelle, et gris les technologies commercialement disponibles [18].



Figure(II). 1: Organigramme des différentes technologies de production de froid à partir de l'énergie solaire.

II-4-Réfrigération solaire par sorption :

Les systèmes existants de production de froid utilisant l'énergie solaire thermique sont basés sur trois phénomènes de sorption, le procédé par absorption liquide-gaz, procédé par adsorption solide-gaz et le procédé par réaction chimique [15].

II-5-Description du système solaire :

L'énergie thermique nécessaire au fonctionnement de ces technologies provient du rayonnement solaire. Un champ de capteurs est utilisé afin de collecter l'énergie solaire. Sa surface varie de quelques mètres carrés pour les plus petites installations à 2700 m² de capteurs pour la plus grosse installation de refroidissement solaire [18].

La captation de l'énergie solaire est une technique connue depuis l'antiquité. Les premiers dispositifs rudimentaires employés utilisaient des miroirs qui concentraient les rayons lumineux sur un four. Les capteurs solaires thermiques sont un genre spécifique d'échangeurs de chaleur qui transforment le rayonnement solaire en chaleur, et transfèrent cette chaleur vers un fluide caloporteur.

La chaleur ainsi récupérée est soi utilisée directement, soit transférée vers un dispositif de stockage de chaleur.

II-5-1-Les capteurs solaires [18] :

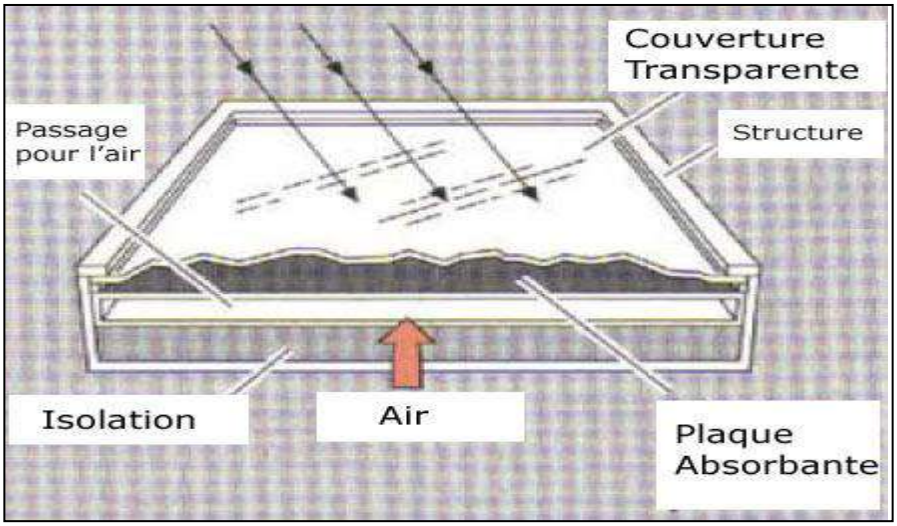
Il existe deux types de capteurs solaires : Les capteurs fixes et les capteurs solaires à poursuite, qui utilisent un système motorisé pour suivre la course du soleil. Ces derniers produisent des hautes températures qui ne sont pas considérées dans les technologies de climatisation solaire actuelles. Les capteurs solaires sont caractérisés par un rendement, le rapport entre l'énergie solaire reçue sur la surface du capteur et l'énergie transmise au fluide. Ce rendement varie en fonction de la différence entre la température moyenne du fluide caloporteur et la température extérieure, ainsi que du rayonnement solaire terrestre.

Les capteurs solaires fixes sont composés d'un absorbeur, chargé d'emmagasiner la plus grande quantité d'énergie solaire grâce à une absorptivité grande et une émissivité faible. De plus, du verre entre l'air extérieur et l'absorbeur permet de laisser passer la quasi-totalité du rayonnement courte longueur d'onde tout en ayant une transmissivité

nulle pour les grandes longueurs d'onde provenant de l'absorbeur. Le verre crée ainsi un effet de serre tout en évitant également les pertes par convection.

On distingue quatre types effet capteurs solaires fixes différents:

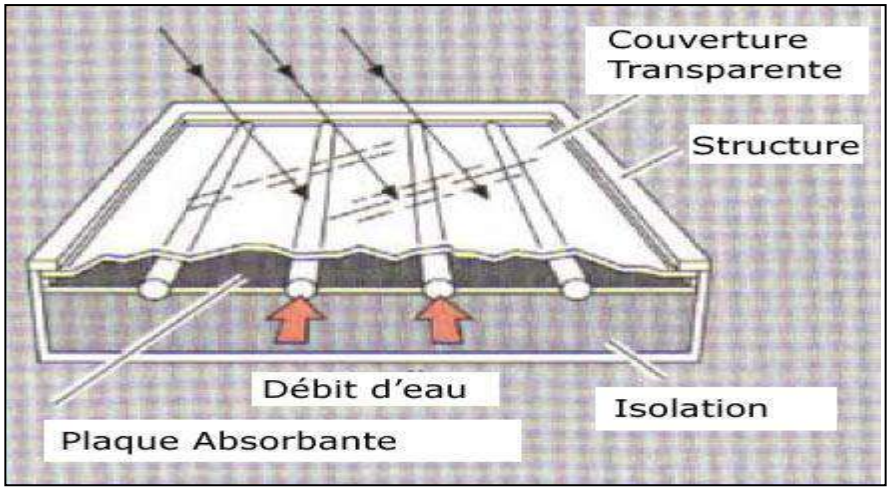
II-5-1-a- Les capteurs à air :



Figure(II). 2: Vue générale d'un capteur à air.

Ils sont utilisés pour le chauffage direct de l'air, généralement pour le préchauffage de l'air neuf. Ils sont utilisés lorsque la température désirée n'est pas très haute (<70°C), car le rendement baisse fortement avec la hausse de la température de l'air caloporteur. L'avantage de ces capteurs est leur faible coût ainsi que la faible complexité d'installation. Des ailettes sont dessinées dans l'absorbeur pour augmenter le coefficient d'échange convectif entre l'air et le fluide caloporteur et l'absorbeur. Ces capteurs peuvent être utilisés dans une installation de desiccant cooling.

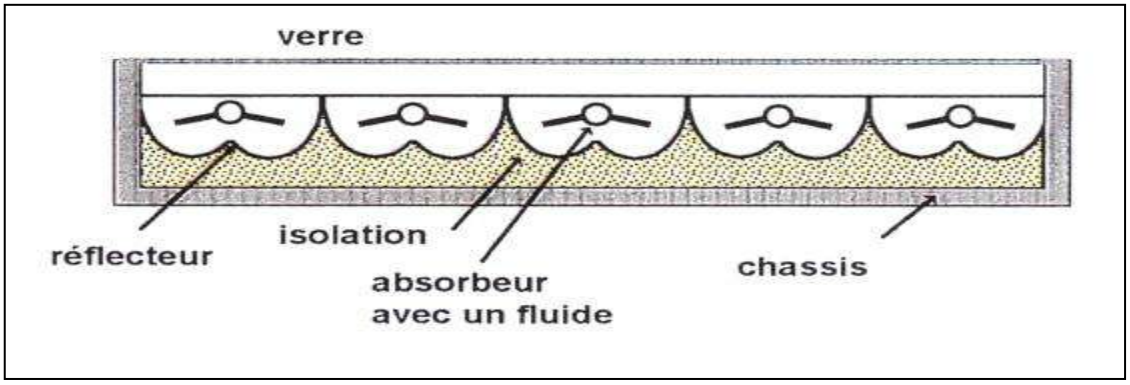
II-5-1-b- Les capteurs plans :



Figure(II). 3: Vue générale d'un capteur plan à eau.

Ces capteurs permettent de chauffer un liquide caloporteur (généralement un mélange eau-glycol). Ils sont utilisés généralement pour la production d'eau chaude sanitaire. Un absorbeur sélectif, ainsi qu'une vitre en verre technique permettent de garder un bon rendement avec des températures de l'ordre de 100°C.

II-5-1-c- Les capteurs à concentration fixes (CPC) :

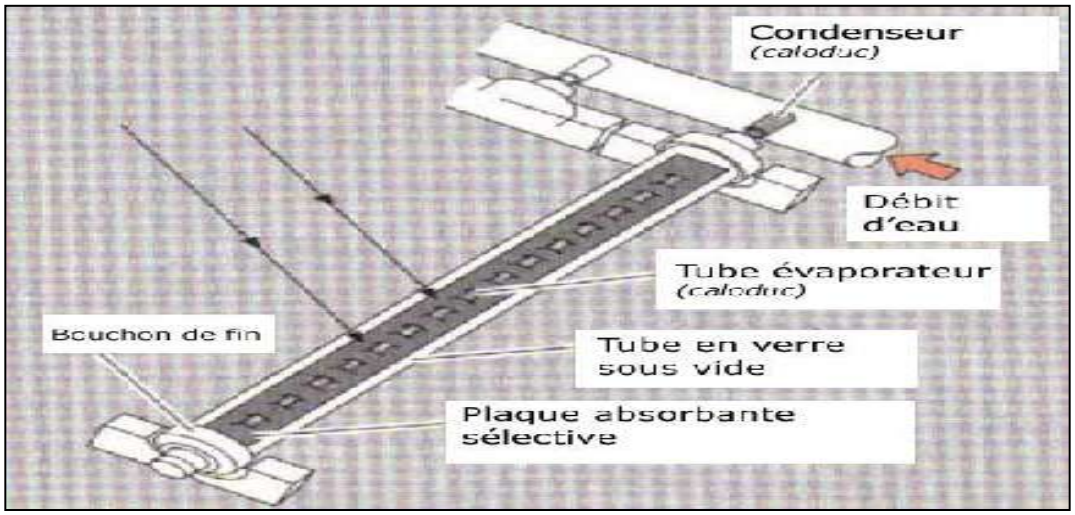


Figure(II). 4: Vue générale d'un capteur CPC.

Ces capteurs sont du même type que les capteurs plans, mais ils concentrent les rayons du soleil sur les absorbeurs à l'aide de réflecteurs disposés en sous face. Ces capteurs sont

très efficaces lorsque l'ensoleillement direct est très fort, mais perdent rapidement en efficacité lors des ensoleillements moindres, ou lorsque le fluide monte en température. Ils sont généralement prévus pour la production d'eau chaude.

II-5-1-d-Les capteurs sous vide :



Figure(II). 5: Vue générale d'un capteur sous vide.

Ces capteurs diffèrent de leur conception car ils sont composés de plusieurs tubes en verre dans lesquels règne un vide poussé, limitant les échangent convectifs entre l'absorbeur (placé à l'intérieur du tube) et le verre. Plusieurs types de capteurs sous vides existent:

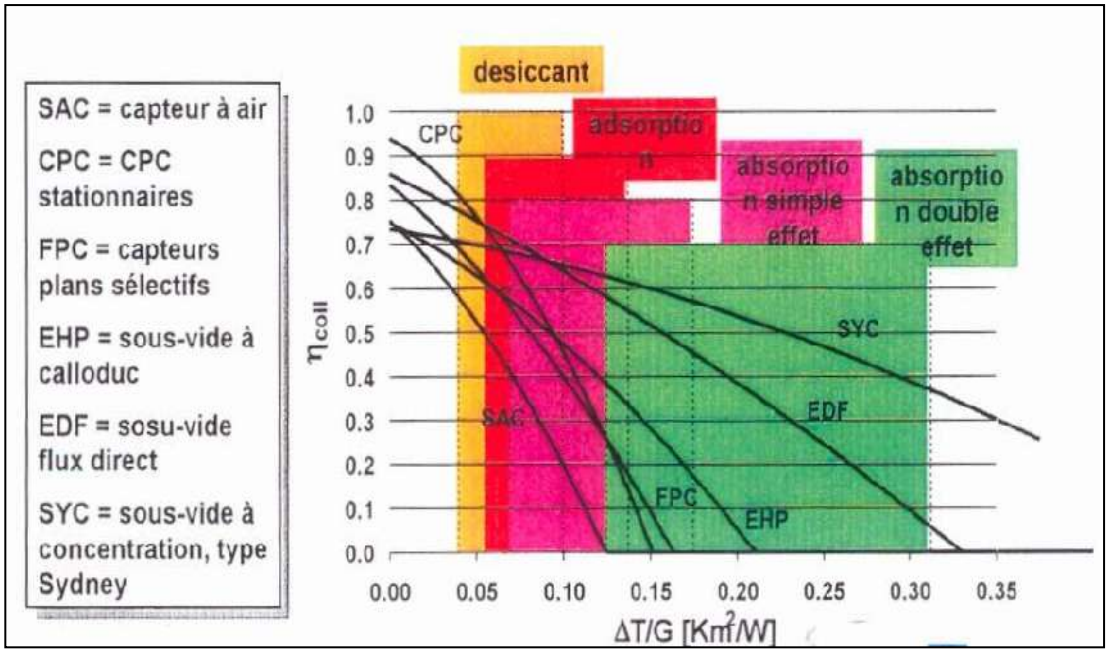
- **Circulation directe:** Le fluide caloporteur passe successivement dans chaque tube pour y être chauffé. Le principe est simple, mais la fabrication est difficile à cause des liaisons verre/métal nécessaires pour la circulation du fluide caloporteur.

- **Capteur à caloduc:** Le liquide à l'intérieur du tube est vaporisé et se condense dans un condenseur et relâche ainsi l'énergie de condensation à un fluide caloporteur circulant au sommet des tubes. Cette conception permet le remplacement aisé d'un tube, car le circuit du tube et le circuit du champ de capteurs n'est pas connecté.

- **Capteur de type "Sydney**": Ils sont réalisés avec deux tubes de verre l'un dans l'autre (obturés aux extrémités par deux soudures verre/verre) et entre lesquels on fait le vide après avoir déposé un absorbeur sélectif concentrique sur la paroi extérieure du tube intérieur. On place ensuite au centre des deux tubes, un tube de cuivre creux en U qui permet l'échange de chaleur, soit directement, soit par le biais d'un caloduc. Cette conception permet d'avoir une soudure verre/verre beaucoup plus sûre que les soudures métal/verre des autres technologies.

La conception des capteurs sous vide les rend plus efficaces pour capter le rayonnement diffus du soleil, et leur rendement diminue peu lorsque la température du fluide augmente, grâce à la très bonne isolation thermique obtenue par le vide poussé ($<10^{-3}$ Pa). Des réflecteurs peuvent être installés sous les tubes afin de réfléchir le rayonnement lumineux sur les faces intérieures.

Chaque type de capteur est caractérisé par une courbe de fonctionnement qui montre l'efficacité en fonction de la différence de température entre le fluide et l'air ambiant, divisé par le rayonnement solaire en W/m² ($\Delta T/G$). A partir des températures de source chaude de chaque technologie de climatisation solaire, il est possible de déterminer quel type de capteurs devra être utilisé. La Figure (II).6 montre cette répartition.



Figure(II). 6: Efficacité des différents capteurs solaires et applications aux différentes technologies de climatisation solaire.

Les capteurs CPC stationnaires ont la plus grande efficacité (proche de 95%) lorsque le rapport ΔT/G est faibles, suivi par les capteurs à sous vide à flux direct, puis les capteurs plans et enfin les capteurs sous vide à caloduc, types Sydney et les capteurs à air ont environ la même efficacité, à savoir environ 0.75.

Pour la technologie desiccant, tous les capteurs peuvent être utilisés. Un optimum entre le coût des capteurs et la surface à installer (qui diminue bien entendu si l'efficacité des capteurs est plus grande) doit être trouvé. Dans les faits on utilisera souvent des capteurs plans ou des capteurs à air.

Pour la technologie à adsorption, on peut utiliser tous les capteurs, sauf les capteurs à air, qui n'offrent pas une efficacité suffisante, et ne sont pas adaptés à l'utilisation d'un circuit liquide. Généralement des capteurs plans ou des capteurs CPC stationnaires sont utilisés.

Pour l'absorption, l'utilisation de capteurs sous vides est vivement conseillée. Les capteurs les plus performants pour les hautes températures sont les capteurs de type Sydney qui perdent peu en efficacité avec les hautes températures.

II-6-Procédé par absorption [15] :

La réfrigération par absorption a été la plus fréquemment adoptée pour les systèmes solaires de réfrigération. Il ne nécessite que très peu ou pas de puissance électrique et pour la même capacité les dimensions physiques d'une machine à absorption sont plus petites que celles d'une machines a adsorption en raison du fort coefficient de transfert thermique de l'absorbant. La technologie actuelle peut fournir diverses machines à absorption avec des COP allant de 0,3 à 1,2. Le choix d'une machine frigorifique à absorption est principalement lié aux performances du capteur solaire à utiliser.

Le cycle à absorption fonctionne de la même manière que le cycle à compression. Seul le compresseur mécanique est remplacé par un compresseur thermochimique, contenant un mélange de deux constituants :

Le réfrigérant qui va circuler dans l'ensemble condenseur évaporateur et un solvant qui interagit très fortement avec le réfrigérant.

Cette interaction est la cause du phénomène d'absorption du réfrigérant dans le solvant avec lequel il forme une solution liquide.

II-7-Description du système de climatisation [17] :

Le système solaire à absorption est composé des éléments suivants :

- Un champ de capteurs solaires à tubes sous vide,
- Un ballon de stockage d'eau chaude à appoint hydraulique intégré,
- Une machine frigorifique à absorption,
- système de régulation.

II-7-1- Capteur solaire :

Pour caractériser les performances d'un capteur, on effectue des essais normalisés selon la norme NF EN 12975-2 et l'équation du rendement d'un capteur est :

$$\eta = B - K\,\frac{(T_{m-}\ T_a)}{W} - K'\frac{(T_{m-}\ T_a)^2}{W} \qquad \text{……. (II-1)}$$

Avec :

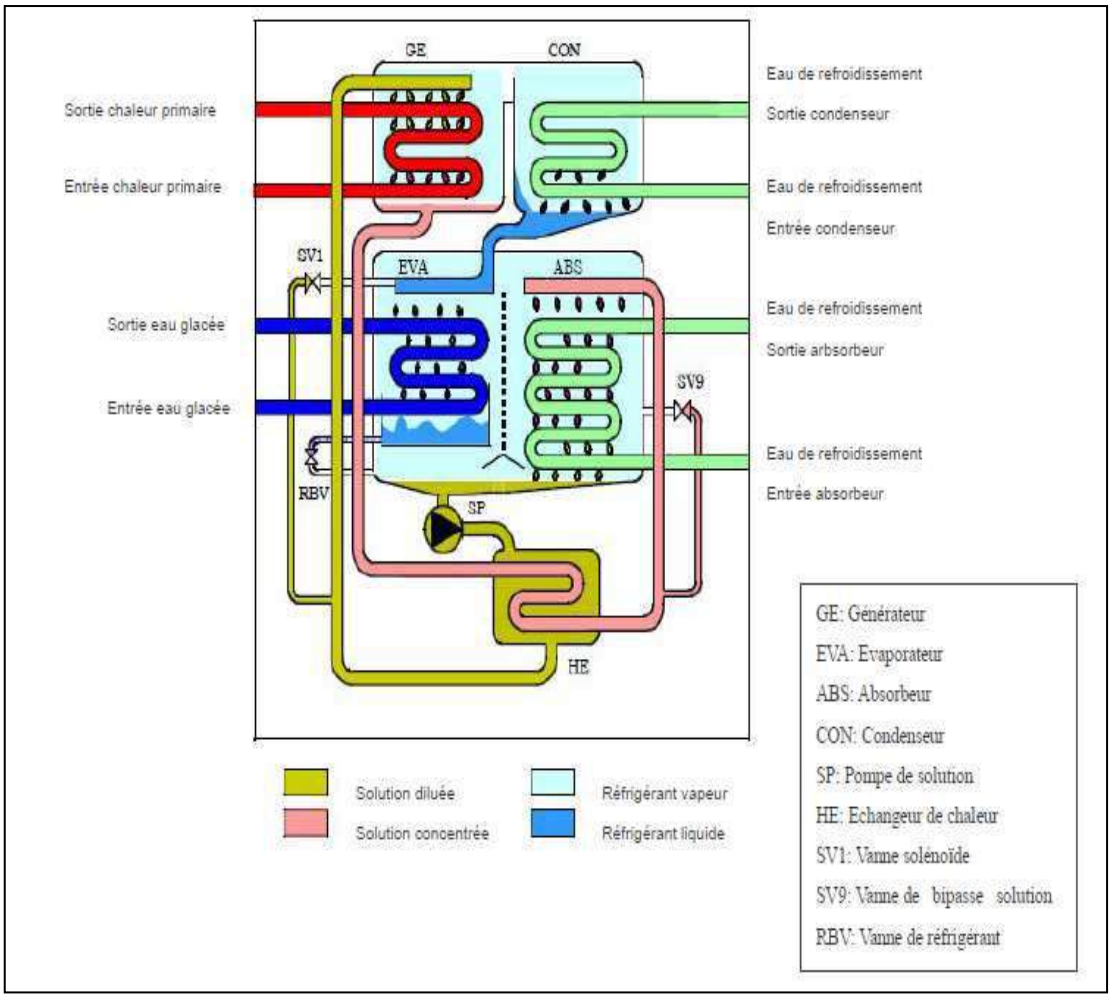
- ***Tm*:** la température moyenne du capteur (en première approche la moyenne entre la température d'entrée et la température de sortie du capteur en °C),
- ***Ta*** : la température ambiante dans l'environnement du capteur (en °C),

- ***W* :** la puissance de l'irradiation solaire mesurée dans le plan du capteur (en $W.m^{-2}$).

Dans la pratique, le coefficient K' étant très faible, il est souvent négligé et un capteur solaire est caractérisé par les coefficients B et K.

II-7-2- machines frigorifique à absorption :

Les machines à absorption sont les systèmes frigorifiques thermiques les plus répandus dans le monde.



Figure(II). 7: Schéma de machines frigorifique à absorption.

a-Historique :

La première machine frigorifique a été conçue en 1877 par Narine qui a utilisé le mélange eau-acide sulfurique dans une installation de laboratoire fonctionnant en continu. Ceci a marqué le début des recherches dans le domaine de la production du froid, bien que l'utilisation de ce mélange a cessé à partir de 1920 pour des raisons de corrosion et de toxicité.

L'idée de produire du froid à l'aide de systèmes à absorption est née durant les années 1859-1860 grâce à Ferdinard Carré qui a déposé le brevet de la première machine frigorifique à absorption fonctionnant avec le couple ammoniaque (frigorigène), eau (absorbant). En utilisant la découverte de Joseph Priestley qui avait constaté en 1784 la grande affinité de ces deux fluides l'un pour l'autre. Le brevet de Carré prévoyait deux types de machines pour la production de la glace: une à faible puissance et à fonctionnement intermittent et une autre plus puissante à cycle continu.

A partir de 1880, Linde« Linde's Ice Machine Company » a mis au point en Europe la première installation à compression de vapeur au détriment de la machine à absorption qui commença alors à perdre de son importance. Une véritable renaissance a été enregistrée au début des années 20, toujours avec le mélange eau- ammoniac grâce aux améliorations proposées par Altenkich, Merkele, Bosniakovic et Niebergall sur l'aspect pratique et théorique.

Les années 40 ont vu apparaître, aux Etats-Unis, la machine à absorption eau-bromure de lithium, où l'eau est le frigorigène, selon une adaptation du cycle de Carré qui est depuis largement utilisée en climatisation. Cependant le marché de systèmes à absorption a connu un repli aux années 50 dû au développement des machines à compression possédant une architecture plus simple et ayant des performances énergétiques meilleures.

Dés 1960 une industrie Japonaise des climatiseurs s'est développée où au début, les machines étaient toutes du type à compression, actionnées par un moteur électrique. Mais les climatiseurs à absorption fonctionnant avec la solution d'eau-bromure de lithium, actionnés par combustion de gaz, se développèrent aussi rapidement pour aboutir à la commercialisation d'un climatiseur à deux étages, de conception Japonaise en 1964.

L'année 1970 a marqué le début de la production et de la commercialisation des groupes à absorption à gaz, dépassant celles des machines à absorption, (Les groupes à absorption GA sont des machines de production d'eau glacée monobloc à refroidissement

par air, l'alimentation en énergie étant assurée par la combustion du gaz naturel ou du propane).

Actuellement et en raison de la conscience écologique de plus en plus grandissante, l'utilisation de l'énergie renouvelable est devenu un recours plus fréquent et en même temps très attractif, créant un cadre de renaissance et de développement pour les pompes à chaleur, dépassant les défauts techniques qui ont pu stopper l'essor de la première génération vers les années 80. Par conséquent, les machines à absorption s'avèrent être des systèmes assez fiables et économiques tout en n'ayant aucune incidence négative envers l'environnement [14].

b- La machine frigorifique à absorption :(état de le recherche) :

La machine frigorifique à absorption a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dans le but d'améliorer son fonctionnement et d'accroître son efficacité. Les travaux ont été principalement focalisés sur le développement du principe de fonctionnement ainsi que la recherche de nouveaux fluides adéquats. Par conséquent plusieurs configurations de la pompe à chaleur à absorption ont été proposées dans un nombre important de travaux de recherche.

Dans cette partie un aperçu général est présenté concernant les systèmes à absorption classiques où certaines nouvelles configurations de cette machine sont rapportées [4], tout en insistant sur celle à démixtion qui fait l'objet de ce présent travail [14].

b-1- Machines à absorption classiques :

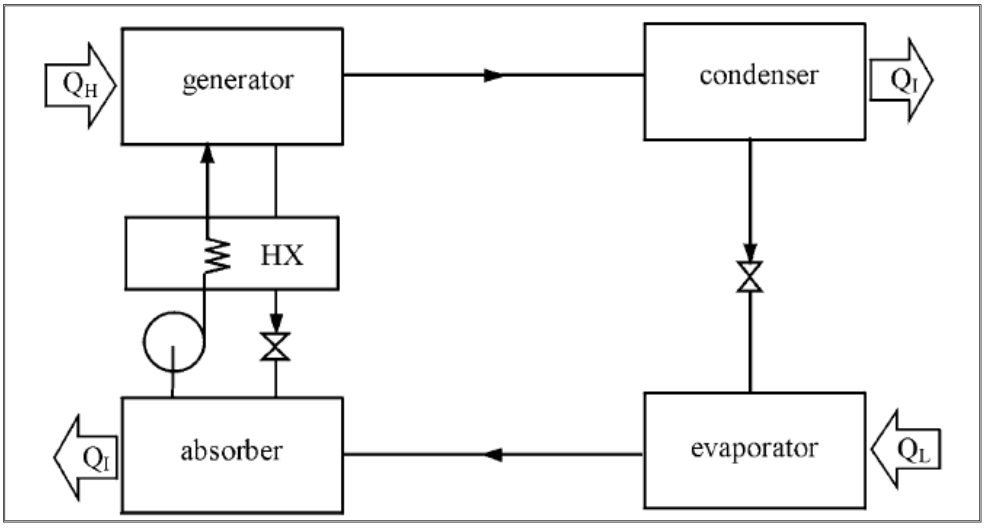
Dans les cycles frigorifiques à compression la force motrice de la revalorisation thermique est la compression d'un fluide frigorigène, généralement un corps pur, entre un puits de chaleur à haute température et à haute pression (*le condenseur*), et une source à basse température (*l'évaporateur*).

Cependant pour les cycles à absorption l'énergie fournie n'est plus une énergie mécanique mais de la chaleur provenant d'une source thermique. Donc au lieu d'une compression, c'est un phénomène thermochimique d'absorption/désorption qui est utilisé pour revaloriser l'énergie. Cette opération d'absorption est basée sur l'affinité relative des molécules d'une substance volatile agent vecteur du froid et une autre moins volatile (ou pratiquement pas) appelées réfrigérant et absorbant, respectivement [14].

Il existe plusieurs configurations des cycles à absorption classiques (*frigorifiques ou thermiques*) dont les plus importantes sont comme suit:

- Système à absorption à simple effet :

La Figure(II).8 montre le cycle frigorifique à absorption appelé aussi frigo pompe avec ses différentes parties comme le condenseur et le l'absorbeur qui rejettent de la chaleur inutile



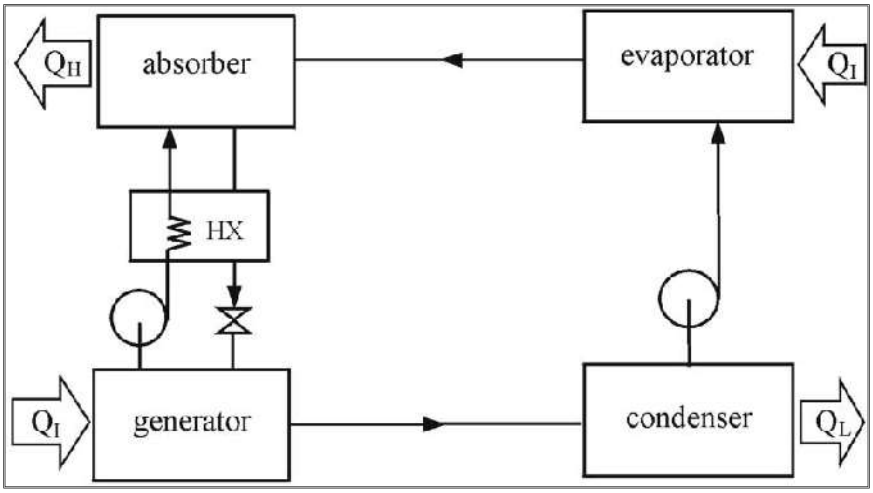
Figure(II). 8: Cycle frigorifique à absorption à simple effet.

dans l'environnement, le désorbeur (*générateur*) qui prélève une quantité de chaleur d'une source à plus haute température et l'évaporateur qui pompe de la chaleur dans l'enceinte à refroidir, produisant ainsi une froideur utile. Ce cas correspond à la production du froid pour des usages divers comme la climatisation des bâtiments, la production de la glace, la conservation des aliments et leurs congélation rapide, etc[14].

-Transformateur de chaleur à absorption :

La Figure(II).9. montre le cycle transformateur de chaleur où l'absorbeur produit de la chaleur utile et le condenseur rejette de la chaleur inutile dans l'environnement. L'évaporateur et le désorbeur prélèvent de la chaleur d'une source peu onéreuse (ou gratuite) à température intermédiaire. Ce cas correspond à la revalorisation des effluents

résiduaires industriels à environ 60°C-80°C en vue d'obtenir des flux énergétiques de niveau beaucoup plus élevé directement utilisables dans les procédés. A titre d'exemple, sur le plan domestique, le thermo transformateur de chaleur peut être utilisé pour le chauffage de bâtiments par prélèvement de la chaleur de l'environnement à environ 5°C[14].

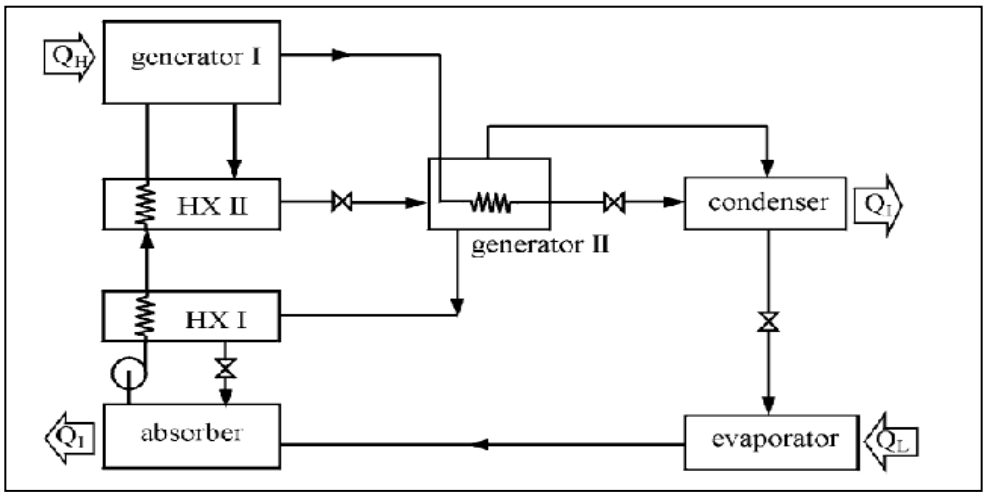


Figure(II). 9: Transformateur de chaleur à absorption.

- Cycles frigorifiques à plusieurs effets :

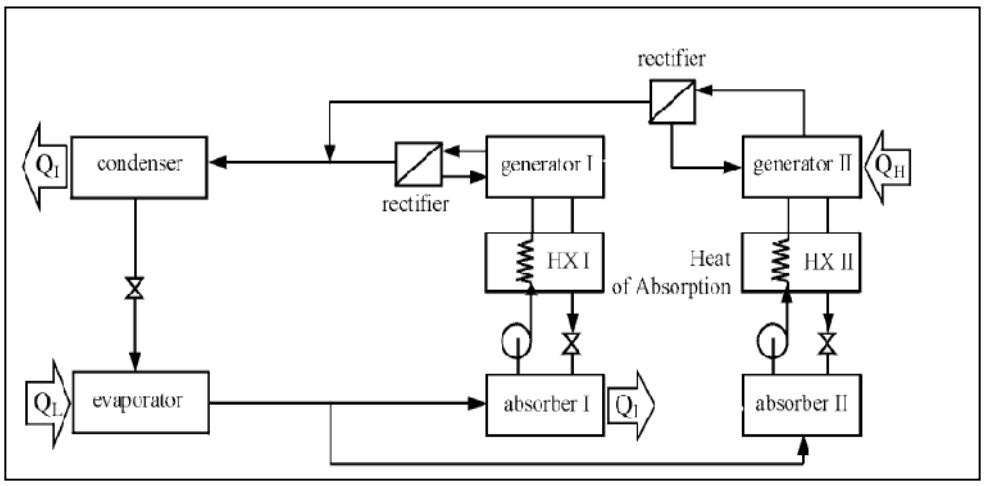
L'objectif du cycle frigorifique à plusieurs effets est d'augmenter la performance du système à absorption, ou accroître leur domaine d'utilisation possible, en faisant usage de systèmes à étages, ou effets multiples. Les variantes possibles sont nombreuses surtouts si l'intérêt porte sur la production simultanée de froid et de la chaleur (*thermo frigo pompes à titre d'exemple*). Le cycle frigorifique à absorption à double effet a été introduit durant la période allant de 1956 à 1958. La Figure(II).10 montre un tel cycle utilisant le système *LiBr/eau,* où la vapeur du réfrigérant générée par le générateur à premier effet est condensée à haute pression dans le générateur à second effet. Cependant la chaleur rejetée est utilisée pour produire une vapeur supplémentaire du réfrigérant à partir de la solution provenant du générateur à premier effet. (*La chaleur issue de la condensation de la vapeur du réfrigérant est utilisée dans le générateur II)*

Si toute la vapeur du réfrigérant provenant du premier générateur se condense dans le second générateur, le *COP* du système devrait être deux fois celui du système à simple effet correspondant [14].



Figure(II). 10: Cycle frigorifique à absorption à double effet opérant à trois niveaux de pression : haute, modérée et basse.

Lorsque le couple *LiBr/eau* est remplacé par *eau/NH3*, la pression maximale dans le générateur à premier effet sera extrêmement haute, et le cycle à absorption à double effet sera configuré comme le montre la Figure(II).11 (*la chaleur d'absorption issue de l'absorbeur II est fournie au désorbeur I dans le but de contribuer au processus de séparation duréfrigérant).*



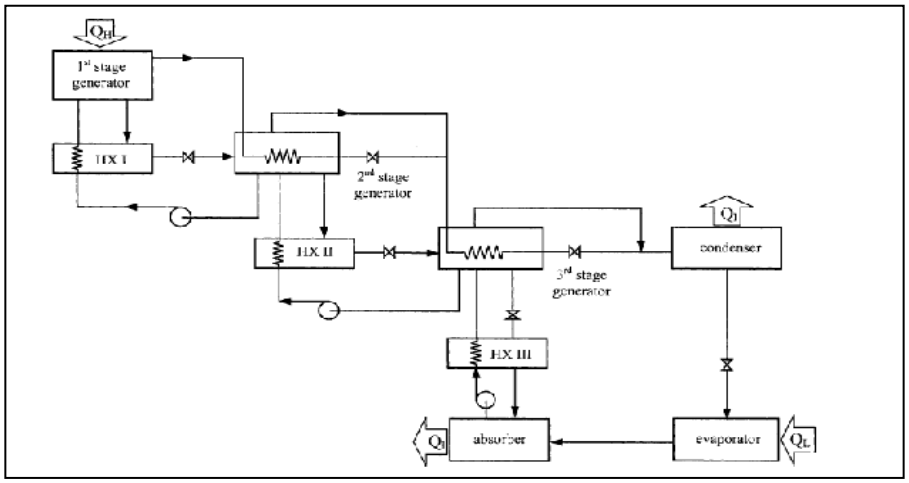
Figure(II). 11: Cycle frigorifique à absorption à double effet opérant à deux niveaux de pression.

En utilisant (*Eau/NH 3*), paradoxalement au système fonctionnant avec *LiBr/water*,

ce système peut être considéré comme une combinaison de deux cycles à simple effet séparés.

L'évaporateur et les condenseurs des deux cycles sont intégrés ensemble comme une unité unique, ce qui permet de se limiter à deux niveaux de pressions seulement dans ce système, avec une pression maximale limitée à un niveau acceptable (*La chaleur issue d'une source extérieure est fournie au générateur II seulement*). Comme l'eau est l'agent absorbant il n'ya aucun problème de cristallisation dans l'absorbeur qui peut opérer à une haute température et rejeter la chaleur au générateur I. Cette configuration de la machine à absorption est classifiée sous la catégorie des systèmes à double effet à co-courant.

Des études théoriques du système à absorption à double effet ont été menées pour différents fluides de travail. Aussi plusieurs types de cycle à absorption à multi effet ont été analysés tel que le cycle à absorption à triple effet. Figure(II).12, et le cycle à absorption à quadruple effet. Cependant il faut noter que l'amélioration du *COP* n'est pas directement liée à la différence de nombre d'effets, car lorsque ces derniers augmentent le *COP* de chaque effet ne sera pas assez grand par rapport à un système à simple effet. En outre, un grand nombre d'effets conduit à un cycle avec design complexe, par conséquent seul le cycle à double effet a été commercialisé[14].



Figure(II). 12: Cycle frigorifique à absorption à triple effet opérant à quatre niveaux de pression.

b-2- Machine à absorption alternative [14] :

Différentes configurations innovantes des machines à absorption ont été proposées et rapportées dans la littérature, avec comme but essentiel le développement des systèmes classiques, tout en axant sur la modification de leur design afin d'améliorer leur performance et d'identifier des mélanges alternatifs, élargissant ainsi leur domaine d'application. Quelques uns parmi ces systèmes à absorption innovants sont décrits dans la section suivante.

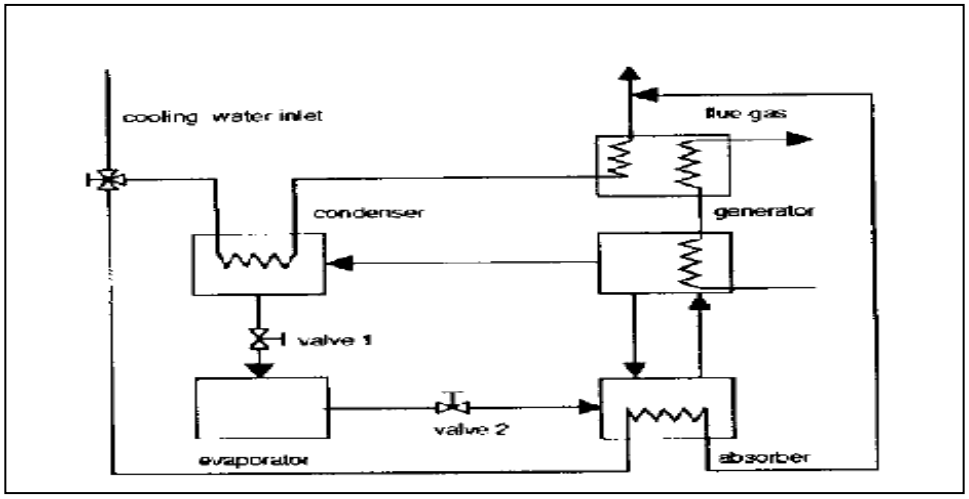
-Pompe à chaleur à absorption à opérations alternatives :

Une pompe à chaleur à absorption opérant en alternatif schématisée sur la Figure(II).13 est construite pour des applications de chauffage de locaux. Le fluide utilisé est un mélange ternaire de LiBr / (eau-CH3OH), ce système est conçu pour récupérer de la chaleur à partir de l'air ambiant. Une puissance de 10kW de gaz brulé peut le faire fonctionner. Il n'ya aucune pompe mécanique dans ce cycle ce qui le rend plus réalisable et potentiellement moins cher qu'un dispositif opérant en continu. Bien que le cycle fonctionne périodiquement, la chaleur est fournie en continu et alternativement dans chaque mode d'opération par le condenseur, l'absorbeur et le flux du gaz. Le cycle opère en trois modes différents :

- ***Mode bouilleur***: les vannes 1 et 2 sont fermées tandis que le bruleur est ouvert, la solution circule donc entre le générateur et l'absorbeur en utilisant une pompe à bulle. Le réfrigérant vapeur sortant du générateur passe au condenseur, et la chaleur produite sera celle issue du condenseur et de l'économiseur du flux de gaz.
- ***Mode générateur*** : après la condensation du réfrigérant liquide suffisant dans le condenseur, la vanne1 est ouverte permettant le transfert du réfrigérant liquide vers l'évaporateur, et similairement au mode de bouilleur la chaleur produite est cédée par le condenseur et l'économiseur du gaz ;
- ***Mode absorption*** : après le transfert complet du réfrigérant du condenseur à l'évaporateur, la vanne 1 sera fermée tandis que la vanne 2 sera ouverte et le bruleur de gaz est éteint, le réfrigérant liquide s'évapore dans l'évaporateur en utilisant une quantité de chaleur de l'environnement, la vapeur issue de l'évaporateur est transférée à l'absorbeur, où elle sera absorbée produisant ainsi

un effet thermique d'où un saut de thermique ΔT ; relativement des basses valeurs de COP ont été obtenues.

Pour des opérations en pompe à chaleur des valeurs du COP variant autour de 1.2 (tenant en compte toutes les pertes) ont été revendiquées si le cycle opère à une température ambiante de 0°C pour produire l'eau chaude entre 30°C et 60°C.



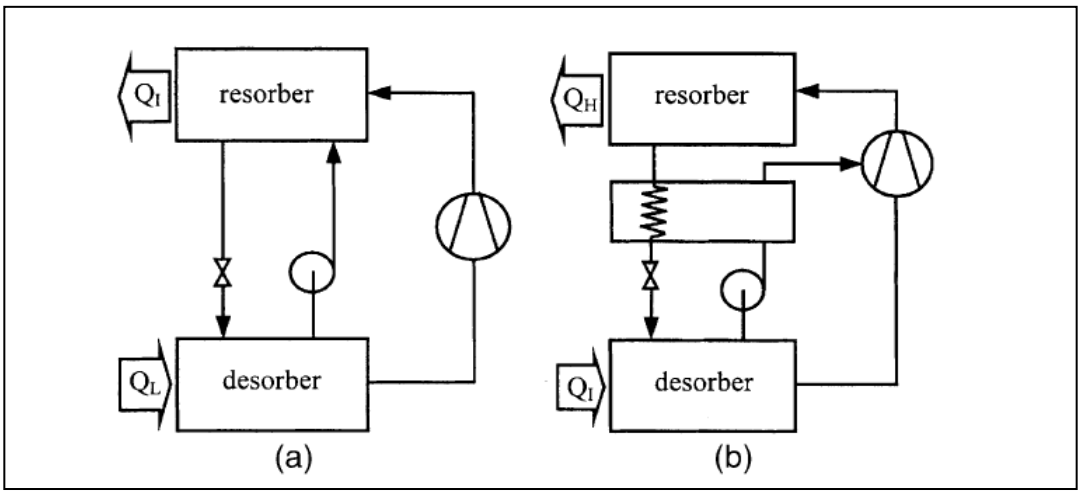
Figure(II). 13: Pompe à chaleur à absorption à opérations alternatives.

- Cycle combiné sorption- compression de vapeur :

Ce cycle est généralement connu sous la désignation système *sorption-compression* est représenté schématiquement sur la Figure(II). 14. a où le condenseur et l'évaporateur d'un système conventionnel à compression de vapeur, sont remplacés par un resorbeur (*absorption de vapeur*) et un désorbeur (*générateur de vapeur*). La particularité d'un tel système est que pour des températures données du milieu à refroidir, la différence de pression parcourant le compresseur est très inférieure par rapport au système conventionnel à compression de vapeur d'où une éventuelle amélioration du *COP*.

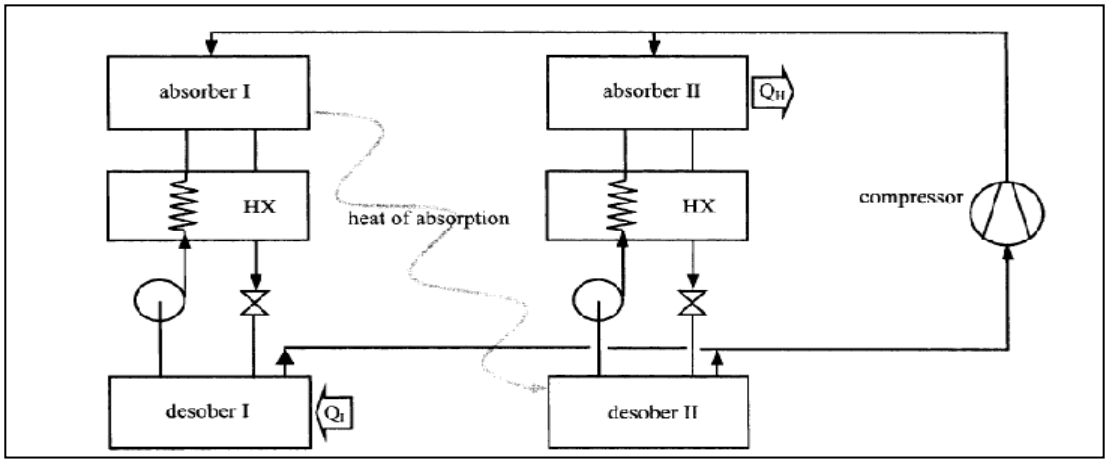
En 1950, Altenkrich a pris l'initiative de réaliser la première recherche en proposant un potentiel de gain d'énergie. Une autre configuration de ce cycle combiné a été développée par Machielsen qui l'a présenté comme étant un cycle pompe à chaleur comme le montré la Figure(II). 14. b. Il a affirmé que les valeurs du *COP*

pouvaient atteindre 4.3 avec une température de 25°C pour la source de chaleur et 55°C pour le puits de chaleur, utilisant expérimentalement le mélange *eau/NH3* comme fluide de travail.



Figure(II). 14: Pompe à chaleur combinée absorption/compression.

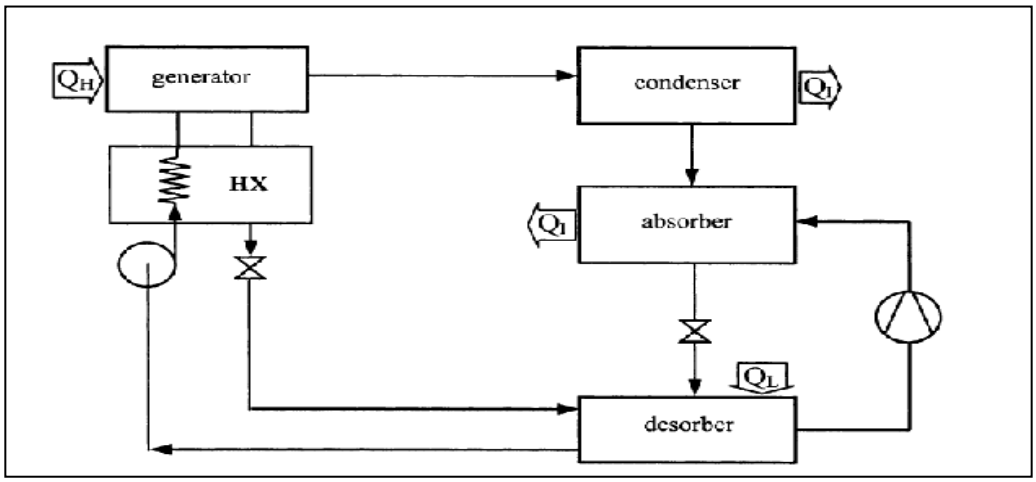
Une autre configuration importante, celle du cycle à sorption /compression à double effet est montrée dans la Figure(II). 15 où la chaleur rejetée de l'absorbeur du premier étage est fournie au générateur du deuxième étage. Le transfert de chaleur se fait intérieurement, surmontant une large différence de température, à un rapport modéré de pressions. Ce concept a montré un succès dans plusieurs études.



Figure(II). 15: Le cycle combiné sorption-compression à double effet configuré commune pompe à chaleur.

Un autre schéma de figure du cycle sorption/compression, a été proposé par Cacciola et al. , il est montré sur la Figure(II). 16. Ce cycle utilise deux combinaisons de fluides

de travail Eau/NH3 et KOH/eau, c'est un compromis des cycles Eau/NH3 et KOH/Eau. La haute pression du système sera réduite et la rectification du système Eau/NH3 est éliminée. Ce cycle peut être opérationnel à une température ambiante inférieure à 0°C sans aucun problème de congélation ni de cristallisation.



Figure(II). 16: Cycle combiné proposé par Caccoila et al. employant deux combinaisons de fluides : NH3/H2O et H2O/KOH.

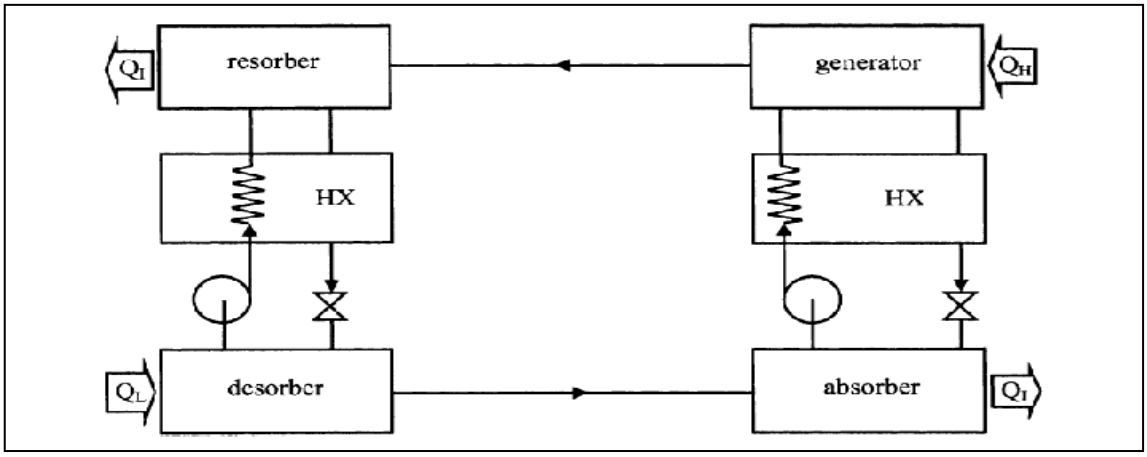
Les premiers résultats expérimentaux d'un cycle sorption /compression avec échangeur de chaleur inter solution (désorbeur /absorbeur) ont été présentés par Groll et Radermacher .

Enfin il faut noter que diverses configurations du cycle combiné (sorption/compression), ont été introduites, ces dernières peuvent produire des valeurs de COP intéressantes. Par ailleurs elles sont complexes et nécessitent une énergie mécanique au niveau du compresseur.

- Cycle sorption- résorption :

En 1913, Altenkirch a présenté l'idée du cycle à sorption-résorption. Ce dernier utilise deux circuits de solutions au lieu d'un seul, la section condenseur /évaporateur dans le système à absorption conventionnel à simple effet est remplacée par un resorbeur-desorbeur respectivement, comme le montre la Figure(II). 17.

Ceci donne plus de flexibilité dans la conception ainsi que les opérations du cycle, avec les concentrations de la boucle de solution pouvant être variées et permettant un ajustement des températures et de pressions au niveau des compartiments selon les besoins.

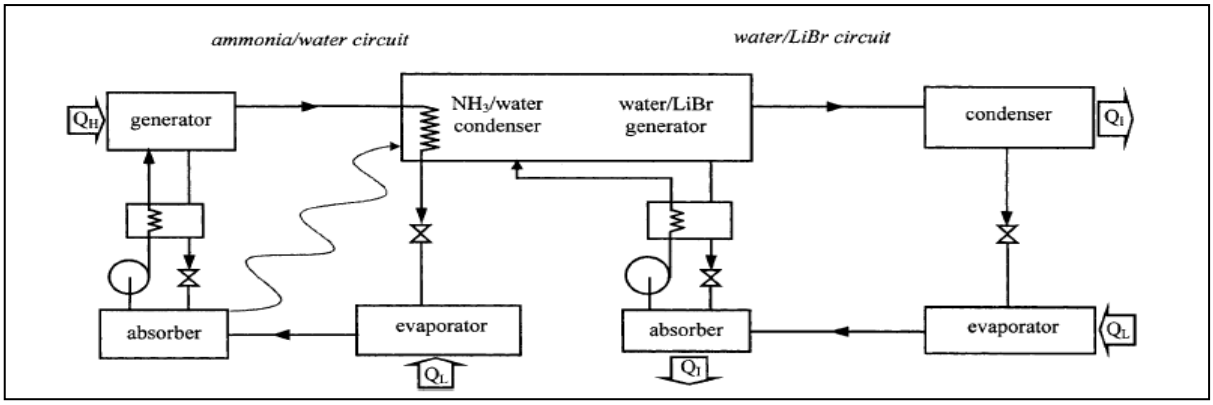


Figure(II). 17: Le cycle à résorption proposé par Altenkirch utilisant deux circuits de solutions.

- Cycle frigorifique à absorption mixte :

Le cycle frigorifique à absorption mixte a été développé en U.S.A par Hanna et al. pour des applications de conditionnement d'air (refroidissement et chauffage). Le concept de ce système est semblable à un système à absorption à double effet, se composant de deux cycles complètement séparés utilisant différents types de fluides de travail.

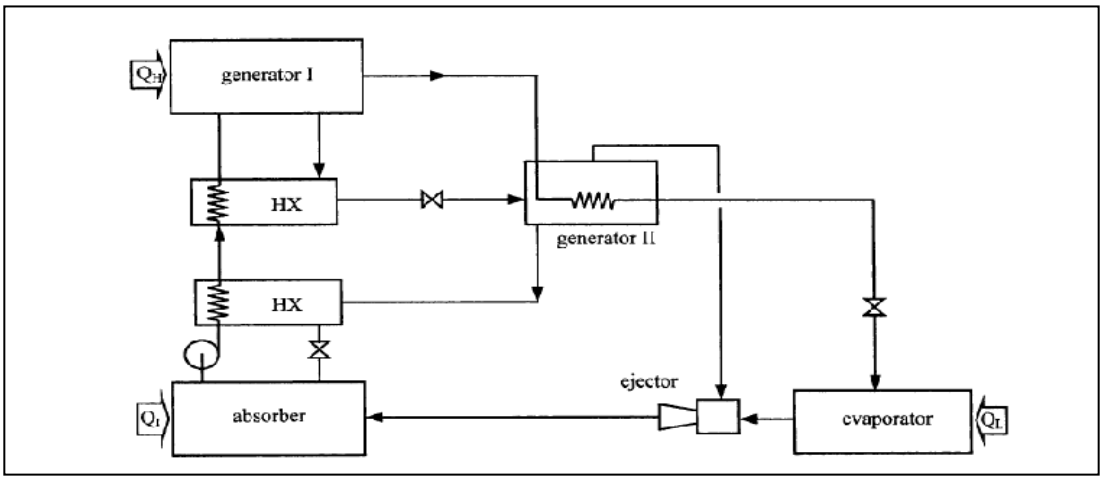
Comme le montre la Figure(II). 18, ce système consiste en deux cycles à absorption à simple effet utilisant eau/NH3 et LiBr/eau. Le système à eau/NH3 fonctionne grâce à la chaleur reçue d'une source externe, la chaleur rejetée de son absorbeur et de son condenseur est utilisé pour faire fonctionner le système à LiBr/eau. Ce dernier (système à LiBr/eau), rejette de la chaleur à l'extérieur (dans un puits de chaleur) habituellement au niveau de son condenseur et de son absorbeur. L'effet frigorifique peut être obtenu à partir des deux évaporateurs.



Figure(II). 18: Cycle mixte à absorption fonctionnant avec l'énergie solaire et utilisant les couples (NH3/eau) et (eau/LiBr).

- Cycle frigorifique à éjection- absorption :

Un éjecteur peut être utilisé pour améliorer la performance d'un système de réfrigération à absorption où une notable approche a été conçue par Kuhlenschmidt et al. , comme montré sur la Figure(II). 19.



Figure(II). 19: Cycle frigorifique à double effet modifié : combinaison éjecteur-absorption (Absence du condenseur).

Le but était le développement du système à absorption en utilisant des fluides de travail où les absorbants sont des sels, capables d'opérer à des basses températures au niveau de l'évaporateur et employant un absorbeur refroidi par l'air. Ce système contient deux étages de générateurs similaires à ceux utilisés dans un système à absorption à

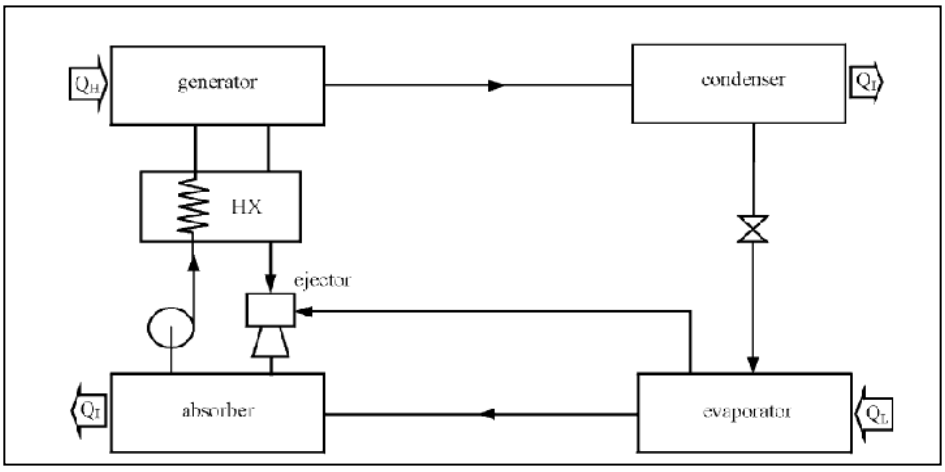
double effet. Mais contrairement au système conventionnel à double effet la vapeur du réfrigérant à basse pression issue du générateur à second effet est utilisée comme un fluide moteur dans l'éjecteur qui entraine la vapeur du réfrigérant provenant de l'évaporateur. L'échappement de l'éjecteur est déchargé à l'absorbeur causant l'élévation de la pression par rapport à celle au niveau de l'évaporateur.

Par conséquent la concentration de la solution dans l'absorbeur peut être loin de la cristallisation si le system nécessite à opérer à une basse température au niveau de l'évaporateur ou à une haute température au niveau de l'absorbeur.

Aussi l'absence du condenseur peut être noté dans ce système car la vapeur du réfrigérant à haute pression est condensée dans le générateur à second effet et la vapeur du réfrigérant à basse pression est utilisé comme fluide moteur dans l'éjecteur.

Aucun résultat expérimental ni théorique n'est disponible pour ce système, néanmoins on peut prédire que le COP ne sera pas supérieur à celui des systèmes à absorption à simple effet, tant qu'une partie de la vapeur du réfrigérant générée est déchargée directement à l'absorbeur (comme fluide moteur), sans aucune production d'effet frigorifique. En outre l'absorbeur utilisé a besoin d'avoir une assez grande capacité d'absorption par rapport à d'autres systèmes à absorption de même capacité frigorifique.

Une autre approche de l'utilisation d'un éjecteur dans un système à absorption a été introduite par Chung et al. et Chen.



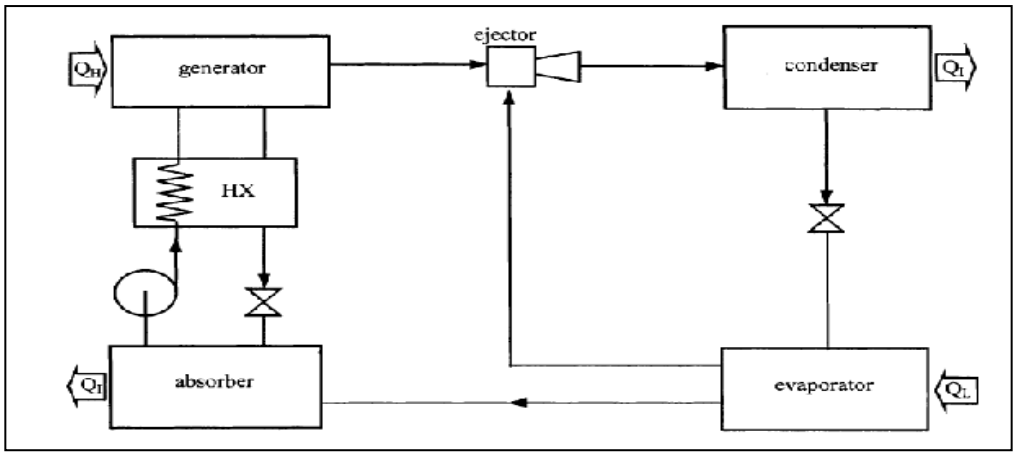
Figure(II). 20: Cycle combiné éjecteur-absorption utilisant le DMETEG/R21 comme fluide de travail.

Comme le montre la Figure(II). 20, similairement à Kuhlenschmidt, un éjecteur est utilisé pour maintenir la pression au niveau de l'absorbeur plus haute que celle au niveau de l'évaporateur. Contrairement au système précédent le fluide moteur de l'éjecteur est la solution liquide à haute pression provenant du générateur, donc un réfrigérant de haute densité et à haute pression, peut être utilisé du fait qu'il est souhaitable que le liquide moteur de l'éjecteur ne soit pas une vapeur de basse densité comme l'eau par exemple (*cas du couple LiBr/eau*).

Une investigation expérimentale propose l'utilisation de DMETEG/R22 et le DMETEG/R21 comme fluides de travail, pouvant assurer un rapport de pressions de l'ordre de 1.2 entre l'absorbeur et l'évaporateur.

L'augmentation de la pression au niveau de l'absorbeur due à une réduction de circulation de la solution est inférieure à celle du système conventionnel opérant sous la même condition, d'où une éventuelle amélioration du COP.

Une autre approche a été proposée par Aphornratana et Eame, comme le montre la Figure(II). 21. un éjecteur a été placé entre le générateur et le condenseur d'un système à simple effet à absorption. Le couple LiBr/eau a été utilisé comme fluide de travail. L'éjecteur utilise la vapeur d'eau à haute pression issue du générateur comme fluide moteur. Donc ce dernier opère à une pression plus haute que celle du condenseur. Cela permet l'augmentation de la température de la solution sans avoir le problème de la cristallisation. Si la température et la pression sont simultanément augmentées, la concentration de la solution est maintenue constante et seulement l'énergie fournie au générateur sera légèrement augmentée.



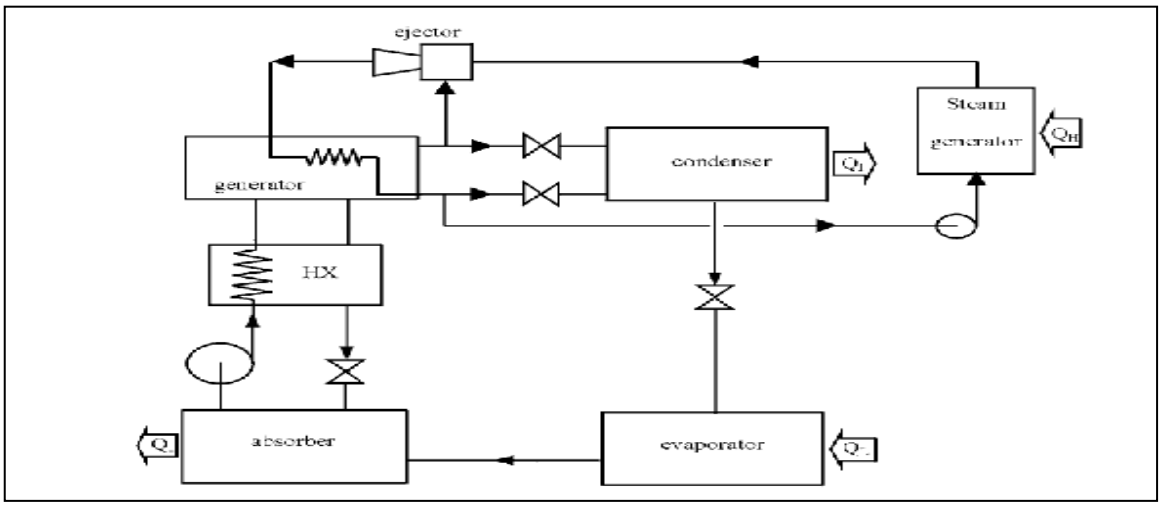
Figure(II). 21: Cycle combiné éjecteur-absorption proposé par Aphornratana et al.

L'éjecteur entraîne la vapeur du réfrigérant provenant de l'évaporateur, produisant donc plus d'effet frigorifique. Le COP est significativement augmenté par rapport à un système à absorption à simple effet. Une investigation expérimentale a montré des hautes valeurs de COP allant de 0.86 à 1.04, mais le fonctionnement d'un tel cycle nécessite des sources de chaleur à haute température de l'ordre de 190 à 210°C ainsi qu'une température acceptable du milieu. De plus la haute valeur de température au niveau du générateur, peut provoquer un problème de corrosion du matériau de construction.

L'approche proposée par Eames et Wu ,est montrée sur la Figure(II). 22 où le cycle est une combinaison entre une pompe à chaleur à jet de vapeur et un cycle à absorption à simple effet. Dans ce système le jet de vapeur est utilisé comme une pompe à chaleur interne employée dans la récupération de la chaleur rejetée durant la condensation de la vapeur du réfrigérant issue d'un cycle à absorption à simple effet.

La pompe à chaleur fournie de la chaleur au générateur d'un système à absorption. La vapeur du réfrigérant produite au niveau de ce générateur sera entrainée dans l'éjecteur et elle est liquéfiée avec la vapeur motrice de ce dernier en rejetant la chaleur à la solution dans le générateur. Dans ce système le problème de la corrosion est éliminé car la température maximale de la solution est maintenue à 80°C.

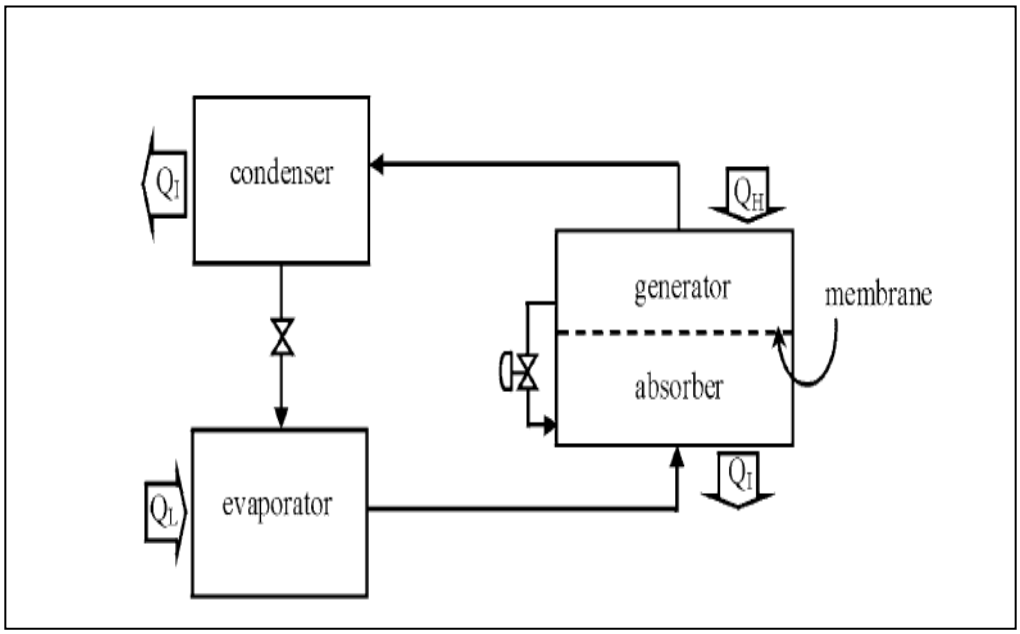
La chaleur motrice (issue d'une source externe) est fournie au générateur à des températures d'environ 200°C, une valeur expérimentale du COP de l'ordre de 1.03 a été montrée.



Figure(II). 22: Cycle combiné éjecteur-absorption proposé par Eames et Wu.

- Cycle à absorption osmotique-membrane :

Ce système est schématisé sur la Figure(II). 23, il a été proposé par Zerweck. Le système consiste en un condenseur, un évaporateur tel que le cycle classique, où les solutions riche en réfrigérant dans l'absorbeur, et celle pauvre en réfrigérant dans le générateur sont séparées l'une de l'autre en utilisant une membrane osmotique qui permet seulement le passage du réfrigérant. Donc le réfrigérant provenant de l'absorbeur peut être transféré au générateur par l'effet d'une diffusion osmotique à travers une membrane sans qu'aucun travail mécanique ne soit fourni à la pompe.



Figure(II). 23: Cycle à absorption osmotique- membrane.

La différence de pression dans le générateur et l'absorbeur dépend aussi du type de la membrane utilisé. En principe cette dernière n'est pas parfaite, l'absorbant issu de l'absorbeur pouvant diffuser avec le réfrigérant vers le générateur, d'où la nécessité d'un clapet de purge pour renforcer la solution dans l'absorbeur. Dans la pratique la membrane doit pouvoir résister à toutes les conditions opératoires de pression, température, des fluides de travail agressifs, et doit minimiser le transfert de chaleur entre le générateur et l'absorbeur.

- Cycle frigorifique à absorption par diffusion (système DAR) :

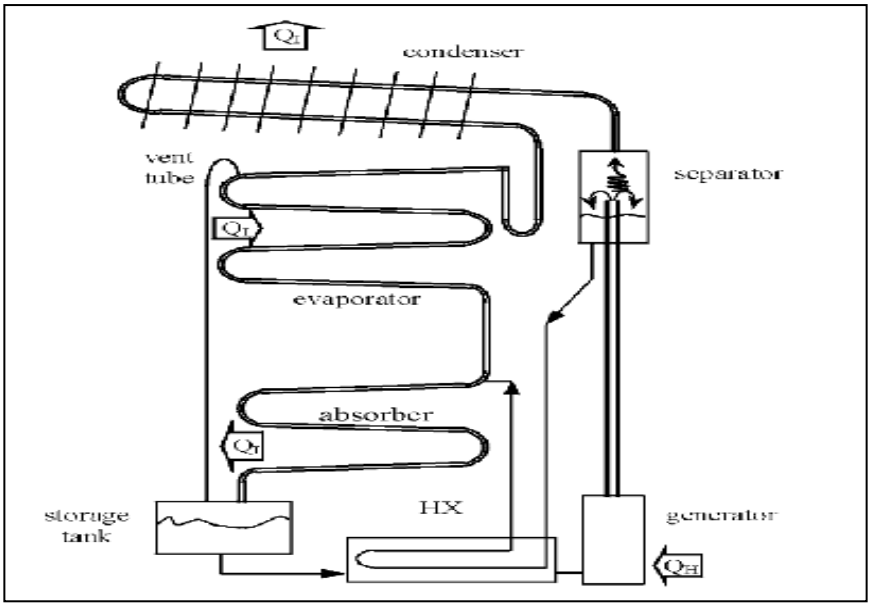
Le *DAR* est un autre type du système à absorption, généralement connu et utilisé il y a plus de 60 ans principalement dans les réfrigérateurs domestiques. Contrairement au cycle conventionnel à absorption, ce système ne nécessite pas une pompe de circulation, cette dernière est remplacée par une pompe à bulle pour faire circuler la solution du mélange frigorifique utilisé qui est le mélange classique eau/NH3.

Etant donné que la différence de pression entre le condenseur et l'évaporateur pour un système conventionnel fonctionnant avec ce mélange est assez large pour être surmontée par une pompe à bulle, l'idée d'ajout d'un gaz inerte dans l'évaporateur et l'absorbeur a été introduite pour résoudre ce problème.

Le concept d'un *DAR* a été proposé par Platen et Munters et la Figure(II). 24 en montre un diagramme schématique. Un gaz auxiliaire est chargé dans l'évaporateur et dans l'absorbeur. Par conséquent aucune différence de pression n'aura lieu dans ce système ce qui permet l'utilisation d'une pompe à bulle.

L'effet frigorifique est obtenu en se basant sur le principe de la pression partielle, puisque le gaz auxiliaire est chargé dans l'évaporateur et dans l'absorbeur, la pression partielle de l'ammoniaque dans l'ensemble évaporateur absorbeur est maintenue suffisamment basse afin de correspondre à la température imposée au niveau de l'évaporateur. Le gaz auxiliaire devrait être non condensable comme l'hydrogène ou l'hélium.

Une caractéristique remarquable de ce système est qu'il peut fonctionner dans les endroits où l'électricité est non disponible. Il a été utilisé pendant longtemps dans les réfrigérateurs domestiques, il ne contient aucune pièce mobile et donc aucune maintenance,



Figure(II). 24: Cycle frigorifique à absorption par diffusion DAR.

En plus il produit moins de bruit durant le fonctionnement. Cependant dans les modèles classiques une capacité frigorifique très petite, inférieure à 50 W, est enregistrée et limite ainsi les applications de cette machine (utilisation dans les réfrigérateurs des chambres des hôtels à titre d'exemple) et ne permet pas son utilisation dans le conditionnement d'air Des modifications de ce modèle traditionnel ont été effectuées tel que l'amélioration de la performance en utilisant l'hélium comme gaz inerte alternatif au lieu de l'hydrogène , qui cause des dangers en cas de fuite. Une étude comparative d'utilisation de ces deux gaz a été réalisée par Kouremenos et al. ainsi que Narayankhedlar et al.

II-8- Fluides de travail utilisé dans les cycles à absorption :

La performance d'un système à absorption est sensiblement dépendante des propriétés physico chimiques et thermodynamiques des fluides de travail utilisés. Par conséquent la combinaison Réfrigérant/Absorbant doit satisfaire certaines caractéristiques tel que:

- Une large différence entre la température d'ébullition du réfrigérant pur et celle de l'absorbant.
- La concentration du réfrigérant dans le mélange doit être assez large que possible.
- La chaleur de vaporisation du réfrigérant doit être élevée.

- Les propriétés de transport (viscosité, conductivité thermique, coefficient de diffusion) doivent être favorables.
- Le mélange doit être chimiquement stable, non toxique et non explosif. Il doit aussi être non corrosif et moins couteux.

Plusieurs fluides de travail ont été suggérés dans la littérature, une investigation établie par Marcriss et al.sur les fluides a montré environ 40 réfrigérants et 200 absorbants potentiels, bien que les couples classique NH 3/eau et eau/LiBr restent les fluides les plus utilisés dont les propriétés sont identifiées, malgré qu'ils présentent certains désavantages. Cependant la recherche de nouveaux fluides alternatifs et adéquats fait toujours l'objet de plusieurs travaux de recherches, comme illustré par le tableau(II). 2 où quelques travaux de recherches sur les fluides de travail d'un système à absorption tirés de la littérature, sont présentés [14].

Auteurs	**Année**	**Fluides de travail**	**Nature des données**
Chang et al.	1968	LiBr/water	Expérimentale
Albertson&Krueger	1971	LiBr/water	Expérimentale
Modahl&Lynch	1971	LiBr/water	Expérimentae
Gupta& Sharma	1976	LiBr/water	Théorique
Krueger	1977	LiBr-$ZnBr_2$/ CH_3OH	Expérimentale
Iyoki&Uemura	1978	LiBr/water	Expérimentale
Mc Neely	1979	LiBr/water	Expérimentale
Ando & Taeshita	1984	DEGDME/R22	Expérimentale
Ziegler& Trepp	1984	Water/NH3	Théorique
Agarwal & Bapat	1985	DMF/R22	Expérimentale
El-Sayed&Tribus	1985	Water/NH3	Théorique
Bhaduri & Venna	1986	5 différents absorbants/R22	Expérimentale
Anand&Kumar	1987	LiBr/water	Théorique
Herold& Moran	1987	LiBr/water	Théorique

Koehler et al.	1987	LiBr/water	Théorique
Bhaduri & Venna	1988	absorbants/R22	Expérimentale
Patterson&Perez Blano	1988	LiBr/water	Expérimentale
Iyoki& Uemura	1989	LiBr/water	Expérimentale
Iyoki& Uemura	1989	LiBr/water	Expérimentale
Iyoki & Uemura	1989	LiBr-Znr$_2$-LiCl/water	Expérimentale
Iyoki & Uemura	1989	LiBr-ZnBr$_2$-LiCl/water	Expérimentale
Iyoki & Uemura	1990	LiBr-ZnBr$_2$-LiCl/water	Expérimentale
Park& Sonntag	1990	Water/NH$_3$	Théorique
Herold et al	1991	NaOH-KOH-CsOH/water	Expérimentale
Zaltash et al.	1991	LiBr/water	Expérimentale
Jeter et al.	1992	LiBr/water	Expérimentale
Hou & Tan	1992	LiBr/water	Expérimentale
Lenard et al.	1992	LiBr/water	Expérimentale
Wen & Lin	1992	LiBr/water	Expérimentale
I.Borde et al.	1997	R124/absorbants organiques	Expérimentale / Simulation
M.S. Rahbar et al.	2000	Mélanges d'alcanes	Expérimentale / Simulation
N.Chakir et al.	2005	Mélanges d'alcanes	Simulation

Tableau (II) 1: Résumé de quelques travaux de recherches portant sur les fluides de travail.

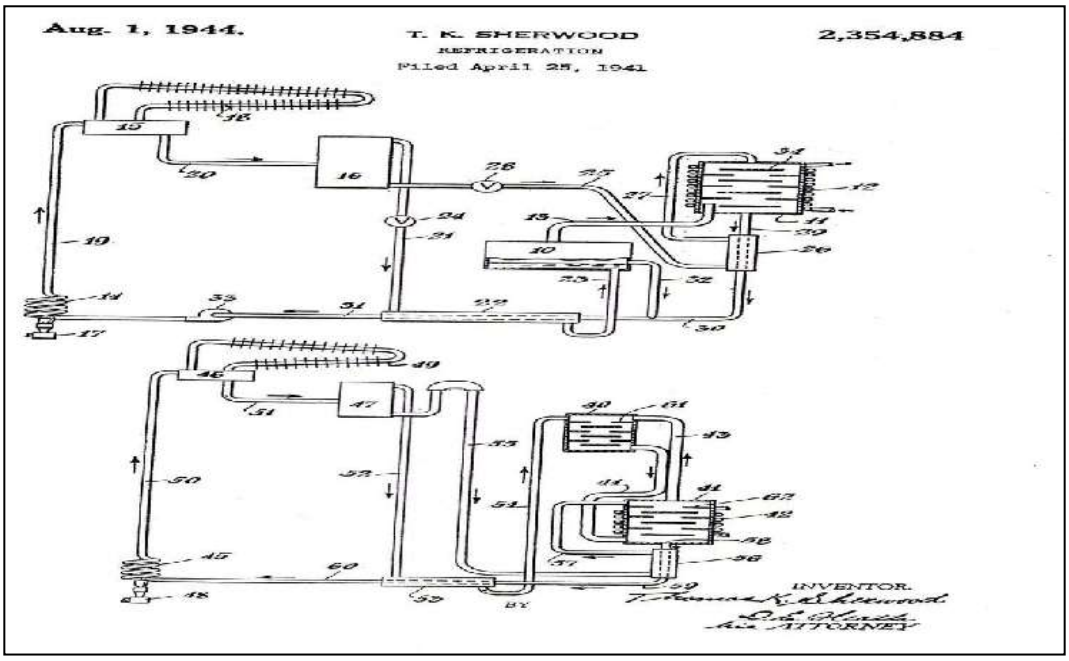
II-9- La machine frigorifique à absorption démixtion :

Fondamentalement son principe consiste à remplacer le fluide de travail habituellement homogène par un mélange liquide présentant une lacune de miscibilité. Ce type de mélange a la particularité de se présenter, pour un domaine de température et une pression donnée, sous forme d'une solution hétérogène constituée par deux phases en équilibre immiscibles. Ainsi pour ces conditions, la démixtion apparaît et le mélange est séparé par simple décantation gravitaire, sans apport d'énergie, en deux phases liquides en équilibre ayant des compositions très différentes. Une autre particularité d'un tel mélange est qu'au-dessous d'une certaine température appelée température critique de démixtion, ces deux phases initialement séparées par gravité redeviennent complètement miscibles et peuvent à nouveau constituer un mélange homogène.

Par conséquent le séparateur d'un tel système à absorption promet d'être économique point de vue énergétique, car la séparation ne nécessite qu'un bac de décantation ce qui constitue une économie considérable par rapport à l'investissement habituel sur une colonne de distillation, par exemple.

L'idée de l'utilisation de mélanges présentant une lacune de miscibilité dans les systèmes à absorption, est assez ancienne et a donné lieu à de nombreux brevets d'inventions. Cependant et malgré que l'idée soit assez intéressante et elle n'a pas connu un développement assez important, facteur qui a été très stimulant pour sa considération dans la présente étude.

Historiquement, la machine frigorifique à démixtion a connu ses débuts avec les travaux de Sherwood en 1940 où il a utilisé le mélange *eau- triéthylamine* dans un réfrigérateur à absorption démixtion, comme schématisé dans la Figure(II). 25.



Ffigure(II). 25: Schéma représentatif d'un réfrigérateur à absorption démixtion proposé par Sherwood.

En 1953, Mills a proposé un cycle similaire en détaillant plus précisément les conditions opératoires pour le dispositif schématisé dans la Figure(II). 26.

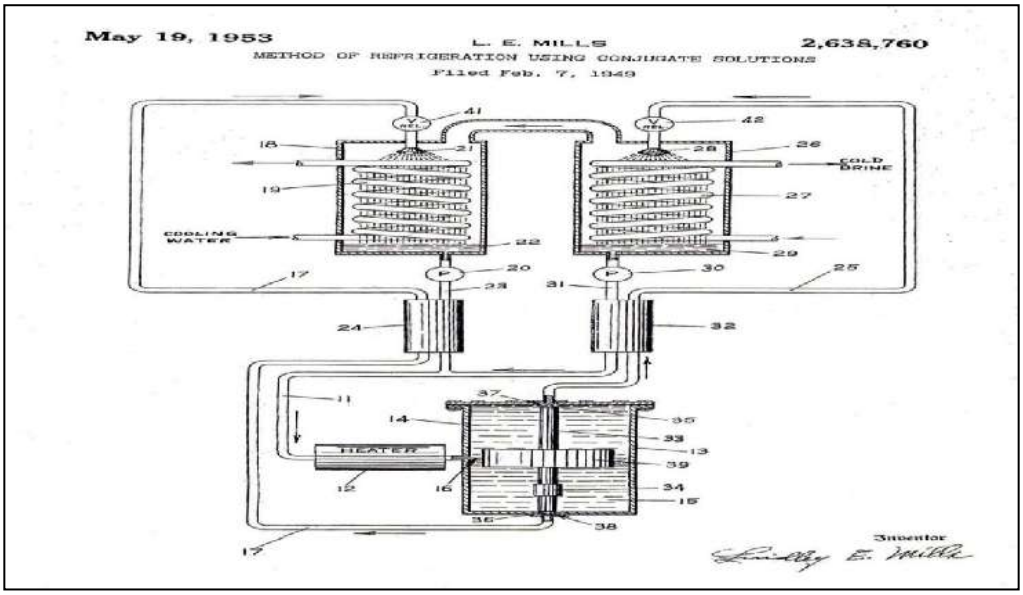
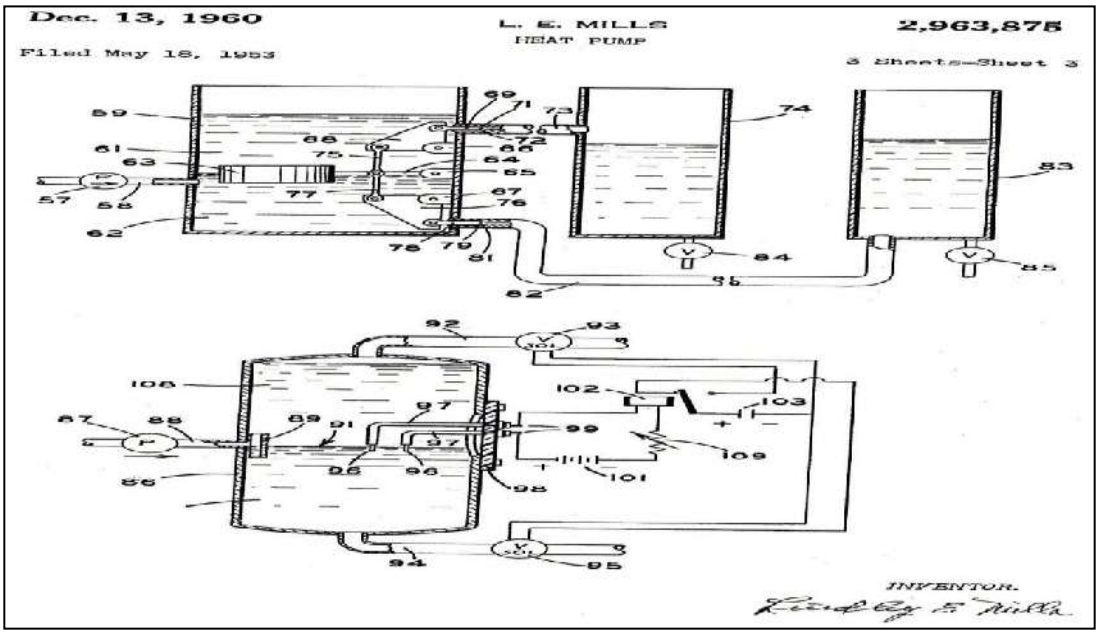


Figure (II). 26: Schéma représentatif d'un réfrigérateur à absorption démixtion proposé par Mills en 1953.

Ensuite en 1960 il a proposé dans un autre brevet, d'autres couples de travail et où il a suggéré l'utilisation d'un tiers corps comme réfrigérant auxiliaire comme montré par la figure(II). 27.



Figure(II). 27: Schéma représentatif d'une pompe à absorption démixtion proposé par Mills en 1960.

En 1978, Jahan et Bouvin , ont décrit une frigo pompe à absorption utilisant des couples de démixtion en proposant un grand nombre de mélanges de travail, particulièrement des mélanges d'hydrocarbures et de polymères, ainsi que d'amines poly substituées et d'eau.

En 1981 Metha a décrit également une installation de frigopompe utilisant le mélange eau methyl, dimethylamine produisant du froid à 10°C avec un coefficient de performance de 0.84.

Plus récemment, en 1994 White et O'Neill ont établis une étude plus générale des performances de telles machines dans laquelle, une comparaison des différents mélanges d'eau et d'amines a été effectuée, tout en évaluant l'influence des paramètres opératoires sur les performances qui a été jugées d'ailleurs insuffisantes.

L'approche de Kernen et al. proposée en 1995 est assez originale et comporte une optimisation multicritères pour évaluer les caractéristiques thermodynamiques des solutions de travail dans les frigopompes à absorption démixtion afin de maximiser le COP. Dans cette étude l'auteur présuppose d'utiliser l'eau comme réfrigérant mais aucun absorbant possédant des caractéristiques optimales n'a était proposé.

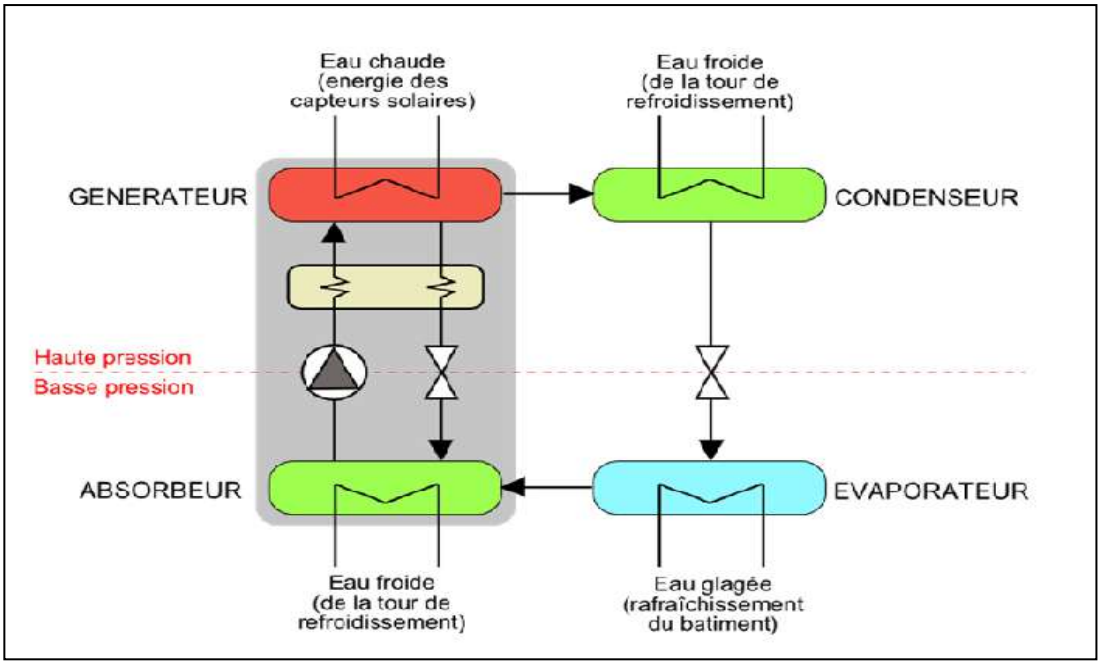
En 1998 M'baye et al. ont présenté une étude de la performance d'une pompe à chaleur à absorption démixtion pour élever la température d'une énergie résiduaire et ils ont déduit que le COP est 100 fois plus grand par rapport à un système classique, en absence d'énergie coûteuse.

En 2002 Alonso et al. ont réalisé une étude expérimentale et une simulation d'un thermo transformateur à chaleur à démixtion décrivant ainsi la faisabilité de la machine, mais des valeurs restreintes de la performance ont été constaté.

Enfin en 2010 Noubli a développé le travail effectué par Alonso sous sa direction, en présentant une optimisation conjointe du transformateur de chaleur à démixtion et des mélanges de travail, un nombre important de fluides de travail, a été proposés, les résultats obtenus ont montré une amélioration de la performance trouvé par Alonso, mais toujours restent loin d'être extrapolés à la commercialisation[14].

II-10-1-Principe de l'absorption :

Du point de vue de l'évaporateur et du condenseur, le principe général de fonctionnement d'une machine à absorption est le même que pour un système de refroidissement à compression classique : A l'évaporateur, le liquide est vaporisé en récupérant de la chaleur d'un circuit à basse température. La vapeur est ensuite compressée pour atteindre un niveau de pression supérieur et se condense à haute température dans le condenseur. Dans le cas d'une machine à absorption, la compression de la vapeur n'est pas effectuée via un compresseur, mais grâce au couplage de deux composants : l'absorbeur et le générateur. Ainsi, la compression du réfrigérant est effectuée en utilisant une solution liquide réfrigérant/sorbant et une source de chaleur qui remplace la consommation électrique d'un compresseur électrique [16].



Figure(II). 28: principe de l'absorption.

Le cycle à absorption passe par les étapes suivantes :

- Evaporation du réfrigérant dans l'évaporateur, ce qui a pour effet d'extraire la chaleur d'une source de chaleur à faible température. Cette étape est à l'origine du rafraîchissement utile et désiré du bâtiment.

- Le réfrigérant est ensuite dirigé vers l'absorbeur dans lequel il est absorbé par une solution concentrée d'absorbant. La chaleur latente d'absorption ainsi que le chaleur de mélange doivent être rejetés. Pour cela, une tour de refroidissement est habituellement utilisée.

- La solution diluée est ensuite pompée vers le générateur dans lequel l'énergie solaire est utilisée pour chauffer la solution au dessus de son point d'ébullition. Ainsi, le réfrigérant et d'absorbant concentré sont séparés. Le réfrigérant sous forme vapeur et sous haute pression est envoyé vers le condenseur, et l'absorbant concentré est renvoyé vers l'absorbeur.

- Le réfrigérant se condense alors, et l'énergie libérée par ce changement de phase doit être évacuée. Pour cela, une tour de refroidissement est habituellement utilisée, de même que pour l'absorbeur.

- La pression du réfrigérant est ensuite brutalement réduite en passant à travers une vanne de détente avant de retourner dans l'évaporateur.

II-10-2-Avantages et inconvénients des machines à absorption :

Avantage :

- Technologie sensiblement plus mature que les autres technologies de froid solaire
- Coefficient de performance plus élevé (de l'ordre de 0,6 à 0,8)

Inconvénients :

- Nécessité de plus hautes températures au générateur
- Les éléments mobiles sont plus nombreux (pompe) d'où une consommation électrique légèrement plus importante [16].

II-11-Procédés par adsorption:

L'adsorption est un phénomène résultant de l'interaction entre un solide (sorbant) et un gaz (fluide frigorigène) basé sur un processus de réaction physique ou chimique.

Les procédés par adsorption ou par réaction chimique solide-gaz sont des procédés où les deux phases (adsorption) et (désorption) du dipôle sont séparées temporellement.

Ceci est dû au fait que l'on ne peut transporter le milieu sorbant solide de la même façon que le sorbant liquide circule dans les systèmes à absorption.

La différence principale entre ces deux procédés réside dans le type de liaison entre le sorbantet le fluide (sorbat) : pour l'adsorption, les molécules de fluide adsorbées à la surface du sorbant sont liées par des liaisons faibles de type Van der Waals [Dieng et Wang (2001)] alors que la sorption chimique implique des liaisons plus fortes, de type liaisons ioniques ou covalentes, avec transformation de la structure chimique des molécules de sorbant [Sumathy et al (2003)].

Pour les procédés d'une réaction chimique renversable, l'état du sorbant est caractérisé par un avancement X, défini comme le taux de chargement du sorbant en gaz de travail. X varie entre 0 (sorbant complètement déchargé) et 1 (sorbant saturé en gaz de travail) [15].

II-11-1-Machines à adsorption :

a-Description de l'installation frigorifique solaire à adsorption :

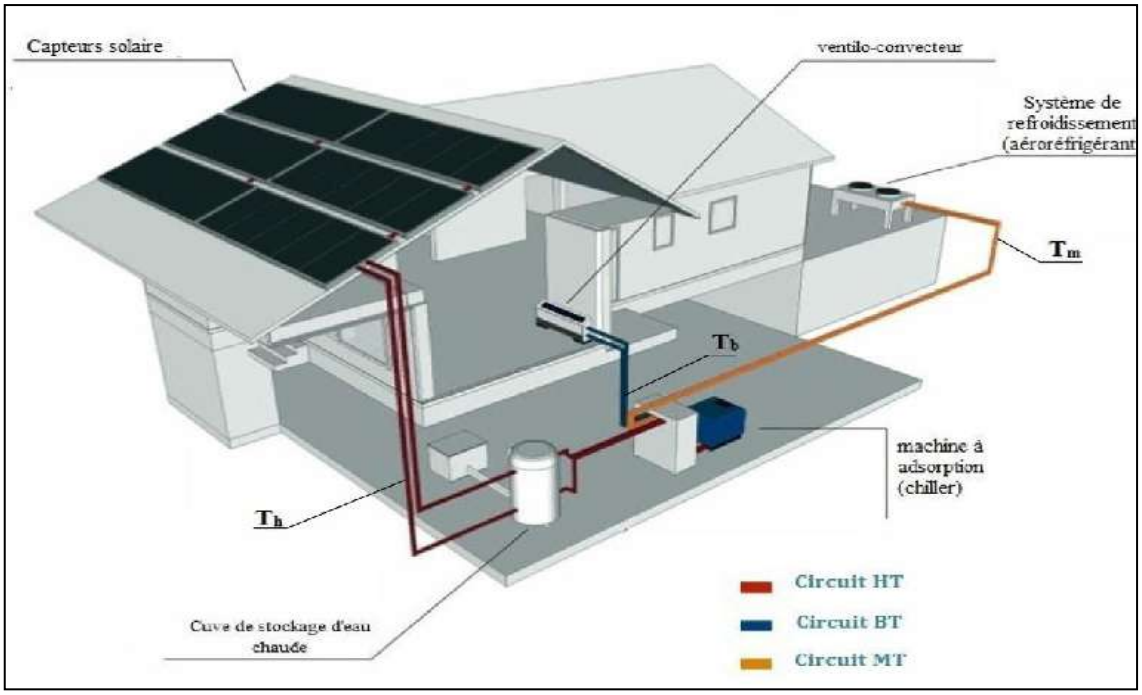
Les machines frigorifiques solaire à adsorption peuvent être caractérisées par trois températures :

- Une température haute Th correspondante à la chaleur motrice fournie au système.
- Une température basse Tb correspondante à celle de la "production de froid.
- Une température intermédiaire Tm au niveau de laquelle la quantité de chaleur prélevée sur l'eau glacée et la chaleur motrice doivent être évacuée.

L'installation "standard" généralement se compose des éléments représentés dans La figure(II).29 à savoir :

- Machine à adsorption (chiller).
- Installation solaire (avec cuve de stockage), appelé circuit HT.
- Système de distribution de froid (ventilo-convecteur lié au l'espace que nous voulons refroidie), appelé circuit BT.
- Circuit de refroidissement (refroidisseur de retour), le plus souvent au moyen d'une
-

our de refroidissement, appelé circuit MT[16).



Figure(II). 29: Schéma descriptif de l'installation frigorifique solaire à adsorption.

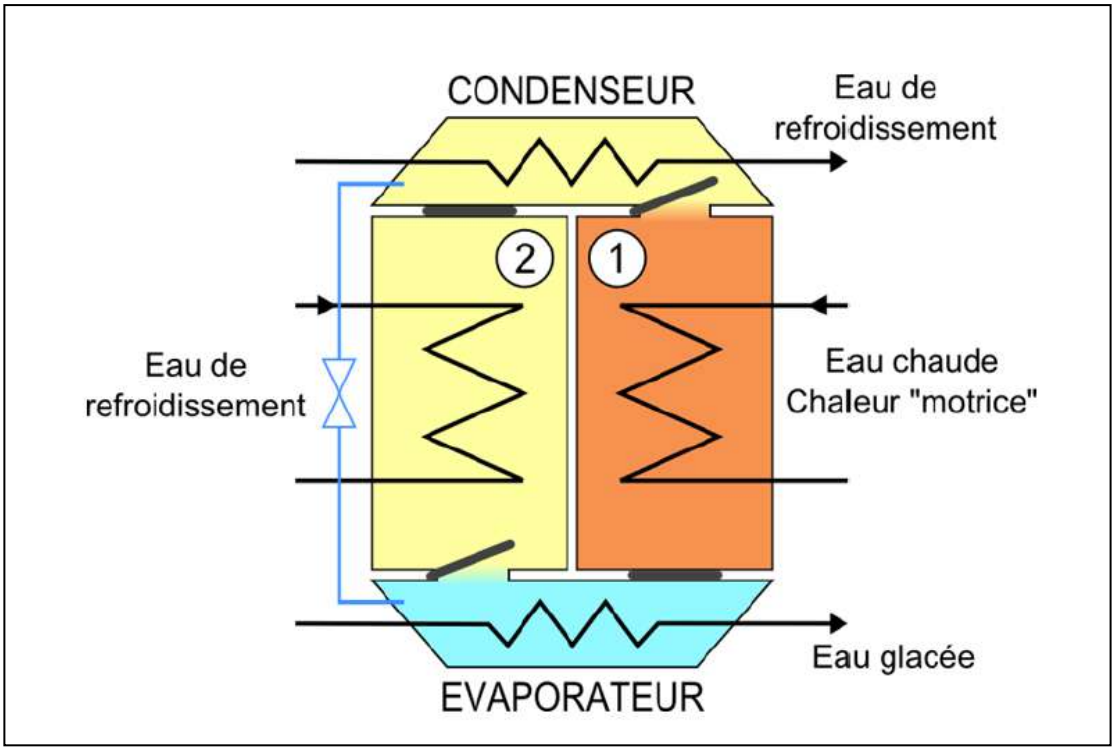
b-Principe de l'adsorption :

Ici, au lieu d'une solution liquide, un matériau solide (un adsorbant) est utilisé.

La machine comprend deux compartiments remplis d'adsorbant (compartiments 1 et 2), un évaporateur, et un condenseur.

L'adsorbant du premier compartiment est régénéré par chauffage (eau chaude solaire), la vapeur d'eau ainsi générée étant envoyée dans le condenseur où elle se condense. L'eau liquide, via une vanne de détente, est envoyée à basse pression dans l'évaporateur où elle s'évapore (phase de « production de froid »).

L'adsorbant du compartiment 2 maintient la basse pression en adsorbant cette vapeur d'eau. Ce compartiment doit être refroidi pour entretenir le processus d'adsorption [16]. Lorsque la production de froid diminue (saturation de l'adsorbant en vapeur d'eau), les fonctions des deux compartiments sont permutées par ouverture et fermeture de clapets.



Figure(II). 30: principe de l'adsorption.

c-Avantages et inconvénients des machines à adsorption :

Avantage :

- Robustesse

- Aucun danger de cristallisation, et donc, pas de contrainte sur la température intermédiaire de refroidissement

- Il n'y a pas de pompe à solution ; les consommations électriques sont donc particulièrement réduites

- La température requise au générateur est généralement plus faible

Inconvénients :

- Taille et poids élevés (mais il existe cependant un potentiel important d'amélioration au niveau des échangeurs dans les compartiments d'adsorption, et donc de réduction de poids et de volume pour les futures générations de machines à adsorption)

- Coefficient de performance est plus faible (de l'ordre de 0,4 à 0,6) [16].

Conclusion :

Dans le présent chapitre, une présentation détaillée sur les capteurs solaires et de la climatisation à absorption et les différentes technologies utilisées ont été présentées.

Nous avons donné aussi une partie non détaillée sur la climatisation à adsorption et comment fonctionnée.

"Chapitre III"

Modèle mathématique

Chapitre III : Modèle mathématique

III-1-Introduction :

L'énergie solaire est utilisée de manières différentes, soit dans les systèmes photovoltaïques pour la production d'électricité ou soit dans les systèmes thermiques (chauffe-eau solaires) pour la production d'eau chaude, domaine où elle connaît un développement considérable particulièrement dans le secteur de l'habitat.

Nous avons présentons modélisation mathématique de gisement solaire et le refroidissement par absorption.

Actuellement, en Algérie, la mesure des données du rayonnement solaire est effectuée d'une manière instantanée et sur certains sites seulement de l'Algérie. Nous avons choisi les sites de Médéa (latitude:36.26º) (longitude:2.75º).

III-2-Paramètres géométriques et atmosphériques :

a- Angle horaire (ω):

Pour calculer l'angle horaire utilisé la formule suivante:

$$\omega = 15\left(TSV - 12\right) \qquad \text{…….. (III-1)}$$

b-Déclinaison solaire(δ) :

Donnée par la relation suivante :

$$\delta = 23,45\sin\left(360/365(N+284)\right) \qquad \text{…….. (III-2)}$$

c- Hauteur du soleil (h) :

$$\sin(h) = \sin(\delta).\sin(\Phi) + \cos(\delta).\cos(\phi).\cos(\omega) \qquad \text{…….. (III-3)}$$

d- Azimut du soleil (a) :

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos(\delta)\sin(\omega)}{\cos(h)} \qquad \text{…….. (III-4)}$$

e- Masse atmosphérique :

On appelle masse d'air mA la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. Utilisé la formule suivante [19]:

$$m_A = \left(\frac{P / P_0}{\sin(h) + 0.50992 * (h + 0.07995)^{-1.6364}} \right) \quad \text{…….. (III-5)}$$

Avec :

$$P / P_0 = \exp\left(-Z / 8434.5\right) \quad \text{…….. (III-6)}$$

f- Epaisseur optique de l'atmosphère (δ_R) :

Pour :

$m_A \leq 20$

$\delta_R^{-1} = 6.6296 + (1.7513 * m_A) - (0.1202 * m_A^{\,2}) + (0.0065 * m_A^{\,3}) - (0.00013 * m_A^{\,4})$ …. (III-7)

Pour :

$m_A > 20$

$\delta_R^{-1} = 10.4 + (0.718 * m_A)$ …….. (III-8)

g- Facteur de trouble de linke(T_L) :

Le facteur de trouble atmosphérique de linke TL représente le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle. L'avantage du facteur de linke est d'exprimer les divers paramètres, tels que la vapeur d'eau atmosphérique et les aérosols en un seul indice facile à utiliser.

Le rayonnement direct normal est exprimé en fonction du facteur TL , selon la formule suivante[20] :

$$I_N = I_0 * \varepsilon * \exp(-T_L * m_A * \delta_R) \quad \text{…….. (III-9)}$$

I_0=1366(w/m^2)

III-3-Modélisation du rayonnement solaire incident sur un plan horizontal (Modèle r.sun) :

a- Rayonnement hors atmosphère :

Le rayonnement solaire extraterrestre ; fonction de la constante solaire I0 et de la correction de distance entre la terre et le soleil ε, est donné par l'équation suivante [20]:

$$G_0 = I_0 * \varepsilon \qquad \text{…….. (III-10)}$$

b- Rayonnement solaire incident sur un plan horizontal :

Le rayonnement global incident sur un plan horizontal IG^h (h,TL) par ciel clair; calculé en W/m2, est divisé en deux parties: le rayonnement direct IB^h(h,TL) et le rayonnement diffus ID^h (h,TL) , chacun étant calculé séparément.

Le rayonnement direct :

$$IB^h(h,T_L) = G_0 * \sin(h) \exp(-0.8662 * T_L * m_A * \delta_R) \qquad \text{…….. (III-11)}$$

Pour l'expression du rayonnement diffus, nous allons prendre la formule publiée par Hofierka et al. avec une légère correction du facteur T_L,

$$T_{LC} = (P / P_0) * T_L \qquad \text{…….. (III-12)}$$

Le rayonnement diffus :

$$ID^h = G_0 * T_{rd}(T_L) * F_d(h,T_L) \qquad \text{…….. (III-13)}$$

$$T_{rd}(T_L) = -1.5843 * 10^{-2} + (3.0543 * 10^{-2} * T_{LC}) + (3.797 * 10^{-4} * (T_{Lc})^2) \qquad \text{….. (III-14)}$$

$$F_d(h,T_L) = A_0 + A_1 * \sin(h) + A_2 \left[\sin(h)\right]^2 \qquad \text{…….. (III-15)}$$

III-4-Modélisation du rayonnement solaire incident sur un plan quelconque par ciel clair :

a-Angle d'incidence

L'angle d'incidence est l'angle que font les rayons du soleil avec la normale du plan considéré. Il est défini par l'inclinaison du plan β et l'azimut de la normale du plan α (orientation du plan).

L'angle d'incidence est calculé à partir du sin (δi) pour le modèle r.sun de la manière suivante[19]:

$$\sin(\delta^{i}) = \cos(\varphi^{'}) * \cos(\delta) * \cos(\omega - \lambda^{'}) + \sin(\varphi^{'}) * \sin(\delta) \quad \text{…….. (III-16)}$$

$$\sin(\varphi^{'}) = -\cos(\varphi) * \sin(\beta) * \cos(\alpha_Z) + \sin(\varphi) * \cos(\beta) \quad \text{……. (III-17)}$$

$$tg(\lambda^{'}) = \frac{-\sin(\beta) * \sin(\alpha_Z)}{\sin(\varphi) * \sin(\beta) * \cos(\alpha_Z) + \cos(\varphi) * \cos(\beta)} \quad \text{…….. (III-18)}$$

III-5- Rayonnement solaire incident sur un plan quelconque (Modèle r.sun) :

Pour un plan quelconque (α, γ), le rayonnement solaire incident IG (h,TL)

γ est estimé par la détermination du rayonnement direct et diffus.

Le rayonnement direct :

$$IB^{i}(h,T_L) = IN(h,T_L) * \sin(\delta^{'}) \quad \text{…….. (III-19)}$$

Le rayonnement diffus :

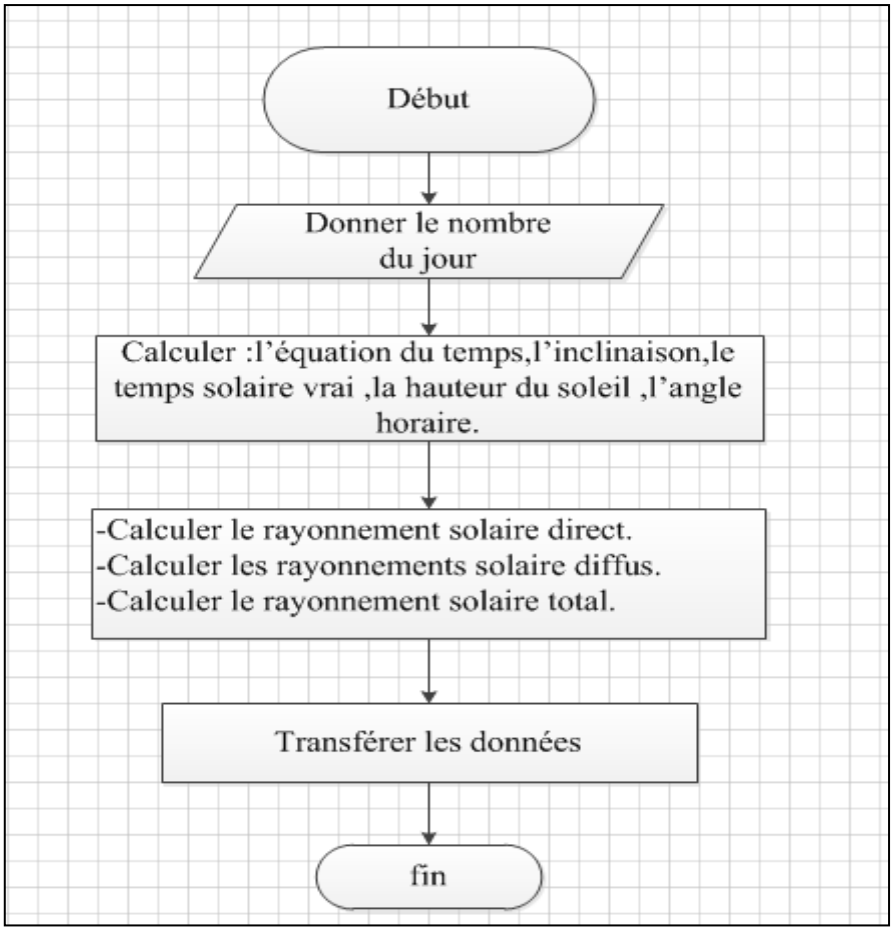
Si $h \geq 0.1(5.7°)$

$$ID^{i}(h,T_{L}) = ID^{h}(h,T_L)\left[F(\beta) * (1-k_b) + k_b * \frac{\sin(\delta^{'})}{\sin(h)}\right] \quad \text{…….. (III-20)}$$

Si $h < 0.1(5.7°)$

$$ID^{i}(h,T_L) = ID^{h}(h,T_L)\left[F(\beta) * (1-k_b) + k_b * \frac{\sin(\beta) * \cos(\alpha_s)}{0.1 - 0.008 * h}\right] \quad \text{…….. (III-21)}$$

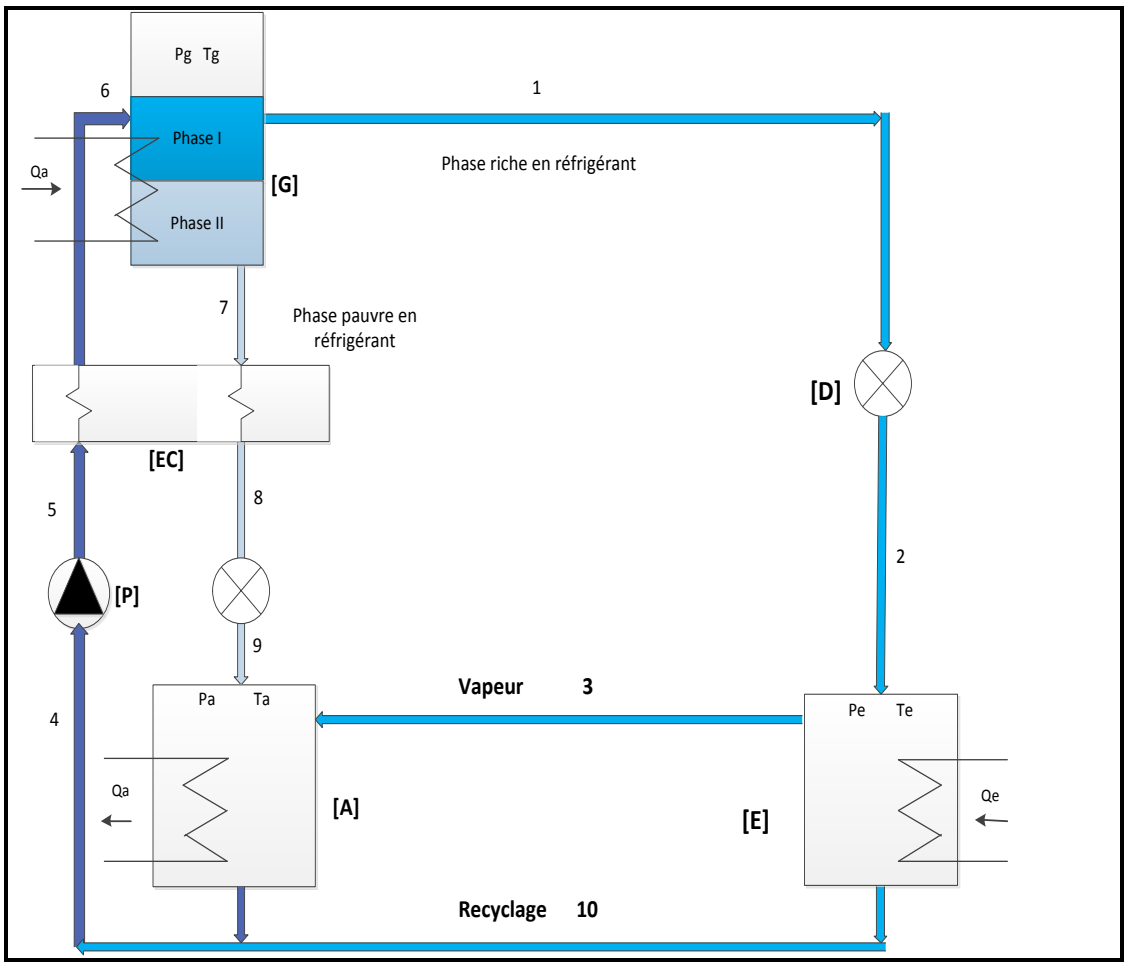
α_S est l'azimut du soleil pour une surface inclinée et F(β) est la fonction du rayonnement diffus du ciel.



Figure(III). 1: Organigramme pour calculer la puissance totale du rayonnement absorbé par le capteur solaire.

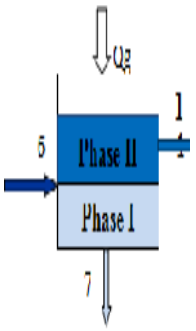
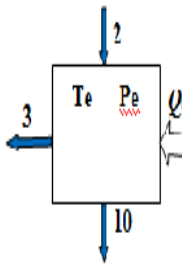
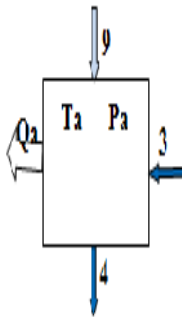
III-6-Modélisation mathématique pour calculer les paramètres de machine frigorifique à absorption :

a-Cycle frigorifique à absorption :



Figure(III). 2: Représentation schématique du cycle frigorifique à absorption en utilisant la séparation de phase (notant l'absence du condenseur).

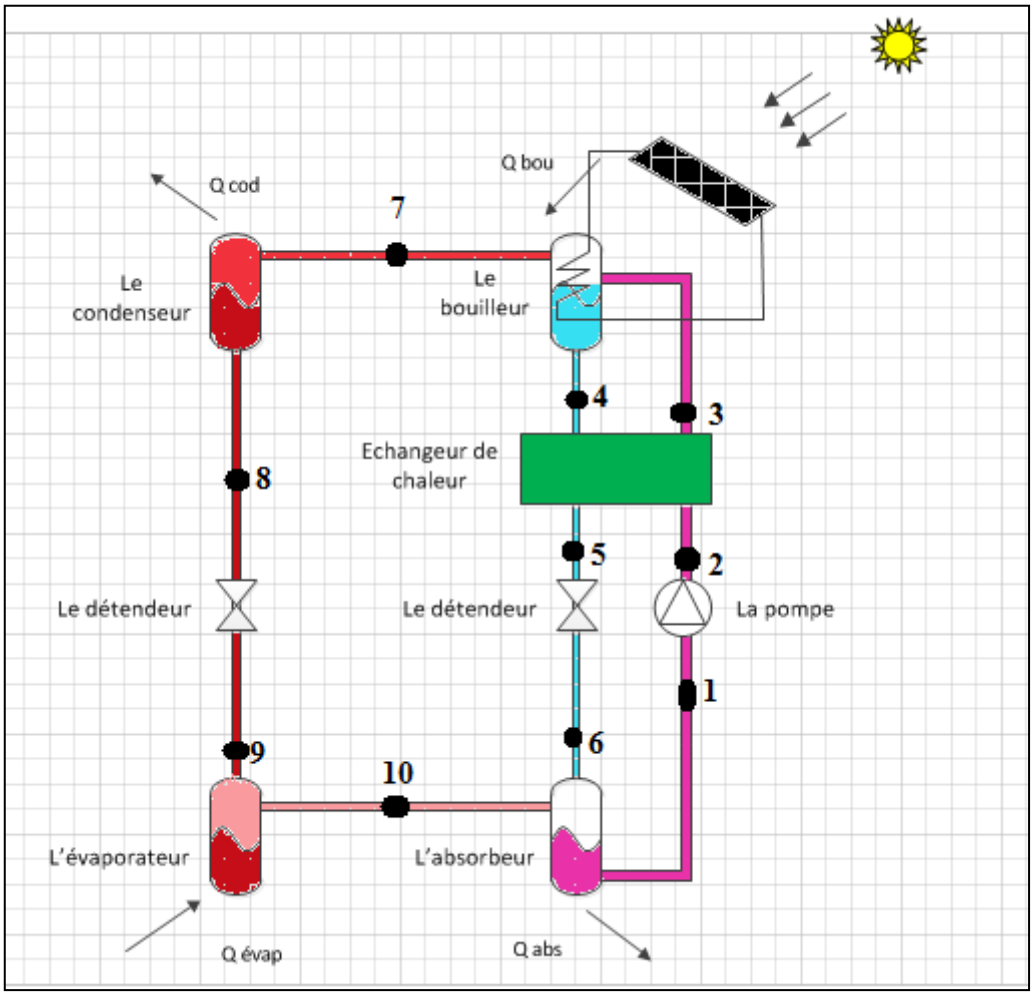
- **[G] :** Générateur.
- **[D] :** Détendeur.
- **[E] :** Evaporateur.
- **[P] :** Pompe.
- **[A] :** Absorbeur.
- **[EC] :** Echangeur de chaleur.

Schéma de principe de chaque composant	Bilan massique Globale	Bilan massique Individuel	Bilan énergétique	Energie fournie
Générateur 	$m_6=m_1+m_7$	$m_6.X_6=m_7.X_7+m_1.X_1$	$m_6.h_6+Q_g=m_7.h_7+m_1.h_1$	$Q_g=m_7.(h_7-h_6)+m_1.(h_1-h_6)$
Evaporateur 	$m_2=m_3+m_{10}$	$m_2.X_2=m_3.X_3+m_{10}.X_{10}$	$m_2.h_2+Q_e=m_3.h_3+m_{10}.h_{10}$	$Q_e=m_3.(h_3-h_2)+m_{10}.(h_{10}-h_2)$
Absorbeur 	$m_9+m_3=m_4$	$m_9.X_9+m_3.X_3=m_4.X_4$	$m_9.h_9+m_3.h_3=m_4.h_4+Qa$	$Q_a=m_9.(h_9-h_4)+m_3.(h_3-h_4)$

Remarques :

- $m_7 = m_{II}$ (Débit massique de la phase II pauvre en réfrigérant).
- $m_1 = m_I$ (Débit massique de la phase I riche en réfrigérant)
- $X1 = X_{riche}$ (Composition du réfrigération dans la phase riche).
- $X_7 = X_{pauvre}$ (Composition du réfrigération dans la phase pauvre).
- **h1=h2**

b-Machine frigorifique à absorption couplée au solaire thermique :



Figure(III). 3: Machine frigorifique à absorption couplé au capteur solaire.

b-1-Principe de fonctionnement :

Une machine à absorption est composée de quatre réservoirs dans lesquels une phase liquide et une phase vapeur sont en équilibre, maintenus à des températures fixes par contact avec des sources de chaleur :

- le bouilleur à la température T_c de la source chaude et à haute pression ;
- le condenseur à la température $T_0 = T_M$ de la source gratuite et à haute pression ;
- l'évaporateur à la température T_f de la source froide et à basse pression ;
- l'absorbeur à la température $T_0 = T_M$ de la source gratuite et à basse pression.

Une pompe sert à comprimer le liquide prélevé dans l'absorbeur, alors que le liquide sortant du condenseur est détendu à basse pression au moyen d'une vanne [20].

La machine comprend deux parties principales :

1- un compresseur chimique, formé de l'ensemble bouilleur-absorbeur, dont le but est de fournir au point 5 un réfrigérant à haute pression, et d'aspirer ce même réfrigérant à basse température au point 8.

2- un ensemble condenseur-vanne-évaporateur identique à celui des machines à compression.

Le compresseur chimique fonctionne en utilisant comme fluide actif un mélange comprenant un réfrigérant volatil (Ex : ammoniaque) et un solvant peu volatil (Ex : eau) [20].

b-2-Modélisation :

En fait le bilan énergétique dans chaque élément :

Condenseur :

$$Qc = \dot{m}_f.(h_8 - h_7) \quad \text{…….. (III-22)}$$

Evaporateur :

$$Q_e = \dot{m}_f.(h_{10} - h_9) \quad \text{…….. (III-23)}$$

Générateur

$$Q_g = \dot{m}_f.h_7 - \dot{m}_r.h_3 + \dot{m}_p.h_4 \quad \text{…….. (III-24)}$$

Absorbeur :

$$Q_a = \dot{m}_r.h_1 - \dot{m}_f.h_{10} - \dot{m}_p.h_6 \quad \text{…….. (III-25)}$$

Détendeur 1 :

$$h_5 = h_6 \quad \text{…….. (III-26)}$$

Détendeur 2 :

$$h_8 = h_9 \quad \text{…….. (III-27)}$$

Pompe :

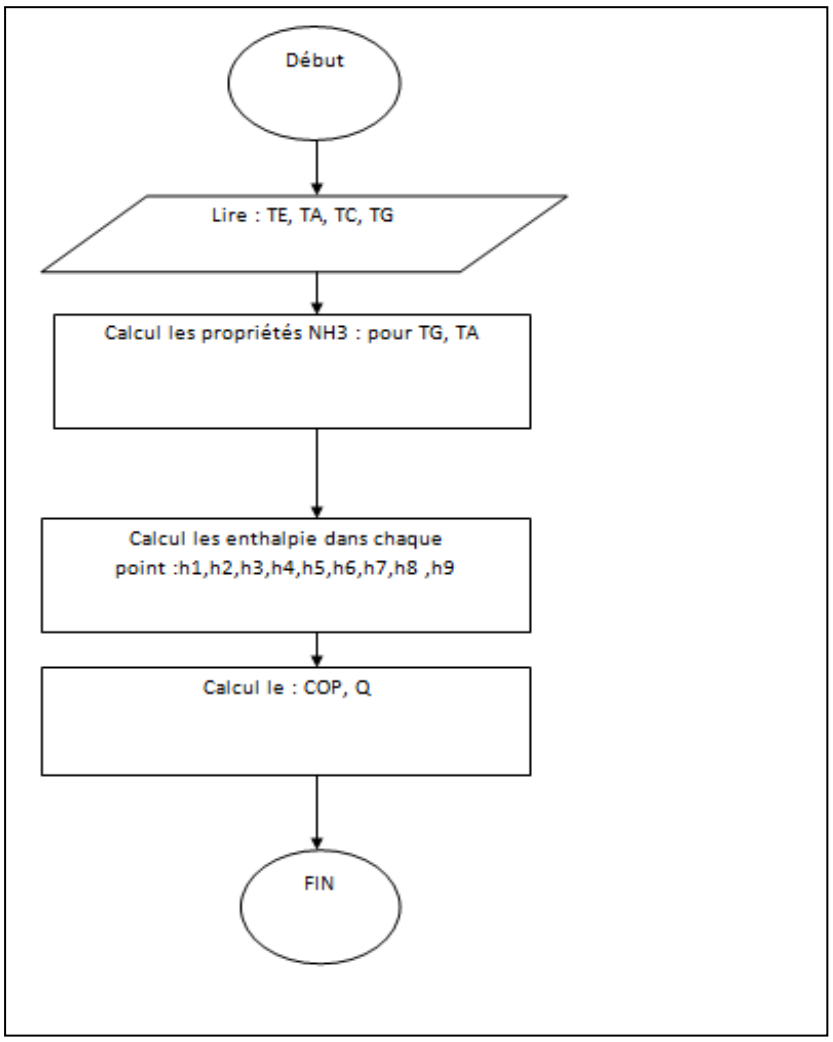
$$W_p = m_r.(h_1 - h_2) \quad \text{…….. (III-28)}$$

Echangeur :

$$E = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_2} = \frac{T_3 - T_2}{T_4 - T_2} \qquad \text{…….. (III-29)}$$

Le coefficient de performance:

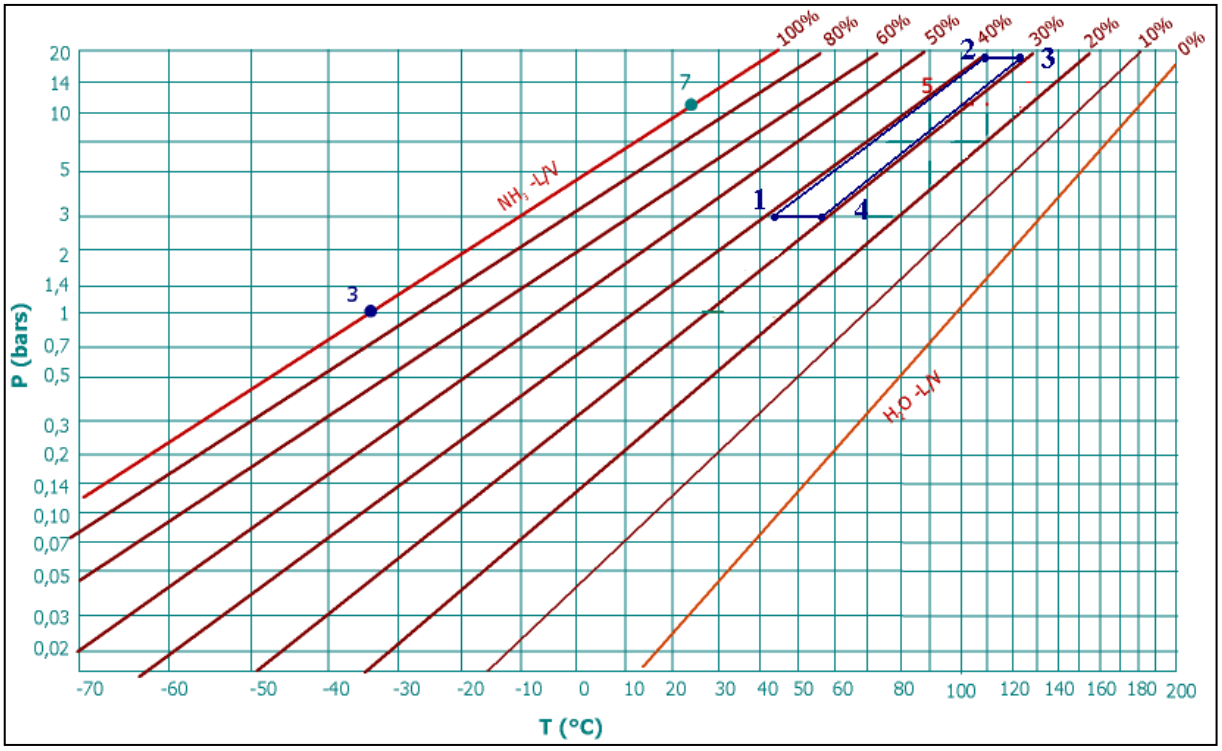
$$COP = \frac{Q_e}{Q_g + W_p} \qquad \text{…….. (III-30)}$$



Figure(III). 4: Organigramme pour calculer le COP et le Q.

b-3-Diagramme d'Oldham :

Les évolutions d'une solution binaire sont accompagnées d'échange de chaleur dont l'intensité dépend de trois paramètres fondamentaux la pression P, la température T et le titre x [20].



Figure(III). 5: Diagramme d'Oldham pour le couple NH3-H2O.

Les propriétés de solution binaire ont été étudiées par divers chercheurs et sont concrétisées par différents diagrammes pour le calcul des installations à absorption. Parmi ceux-ci, celui d'Oldham est l'un des plus simples qui permet une bonne représentation des installations, c'est un diagramme [Ln(p), - 1/T][20].

Pour un titre donné x, il est possible de lier les valeurs de Pet de T par une relation générale du type (U.Eicker 2003) :

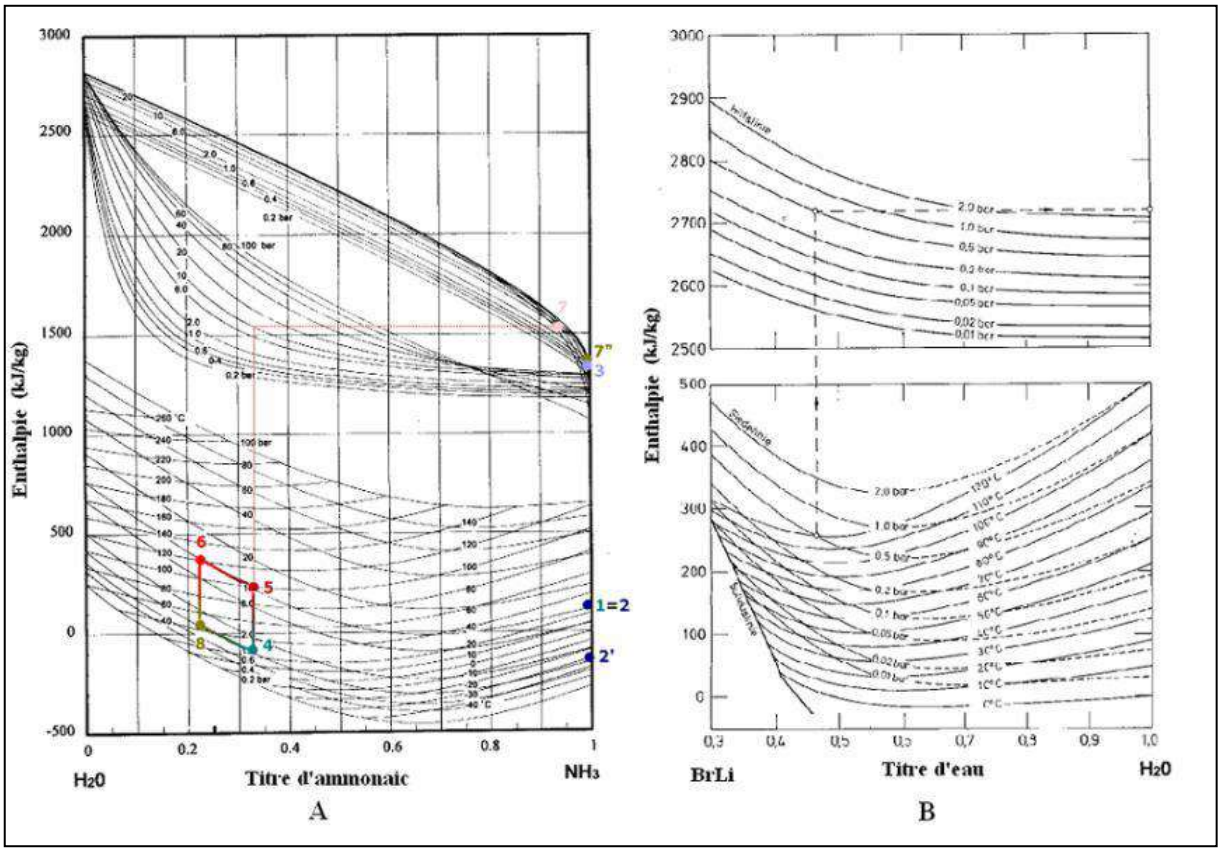
$$\log_{10}(P) = A - \frac{B}{T} \qquad \text{…….. (III-31)}$$

Où les termes A et B sont fonction du titre x, tout en étant différents selon qu'il s'agit de la phase vapeur. Le choix de ces échelles est basé sur la constatation que les lignes d'égale

concentration sont alors des droites, ce qui simplifie grandement leur tracé, puisqu'elles sont déterminées par deux points. Cependant, ce diagramme ne permet ni l'étude énergétique, ni le dimensionnement de la machine [20].

b-4-Diagramme de Merkel :

Il permet une étude complète de la machine à absorption, car en plus des informations données par le diagramme de Oldham, il renseigne, ce qui est fondamental pour les calculs, sur l'enthalpie de la solution liquide (ou absorbant) et de la vapeur du soluté (ou absorbât).



Figure(III). 6: Diagramme de Merkel.

C'est un diagramme h = f(x, T) ou h = f(x, P) paramétré en pression et température pour la solution, en pression pour la vapeur. Il permet de connaître la teneur du mélange vapeur en équilibre avec la solution, en pression ainsi que les enthalpies de chaque point. On prêtera attention aux conventions choisies dans la représentation de ces diagrammes. En effet, on remarque que dans ces diagrammes, on adopte la teneur en eau comme

représentation de la concentration (figure III.6 .B), la teneur en ammoniac comme représentation de la concentration (figure III.6 .A) [20].

b-5-Mélanges pour une machine à absorption :

Bien que, théoriquement, il n'y ait aucune impossibilité d'utiliser des mélanges d'ordre supérieur, on se limite pratiquement aux mélanges binaires qui sont donc une combinaison d'un fluide frigorigène et d'un agent d'absorption [20].

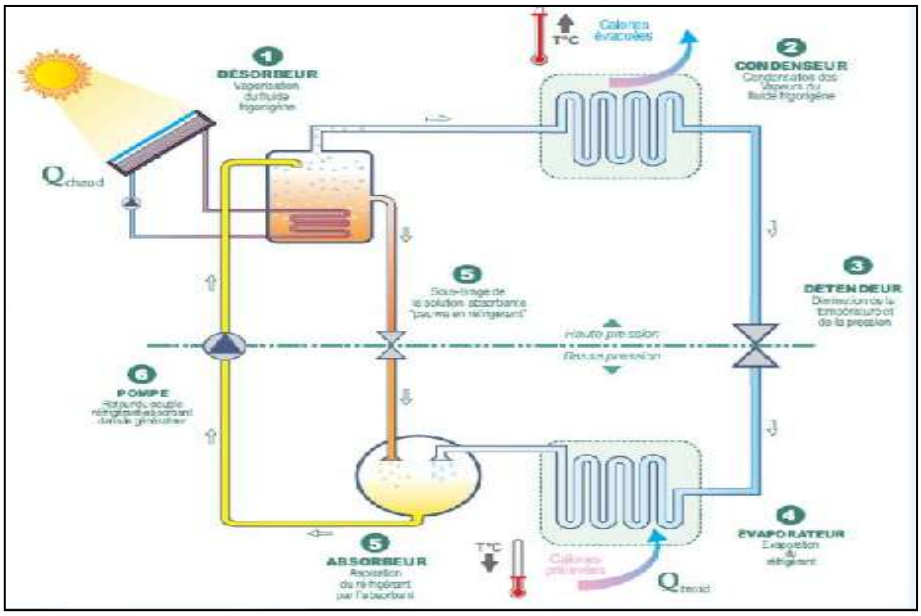
Le tableau suivant donne quelques couples utilisés :

Le réfrigérant	**L'absorbeur**	**Référence**
NH_3	$CaCL_2$ $SrCl_2$ H_2O	(O .C.ILeoje 1985) (P.Worsoe-schmidt 1979) (A.Eahard et al, 1997) (F, Gutiérrez 1988)
H_2O	Sels Halogénures d'alcali LiBr $LiClO_3$ $CaCl_2$ $ZnCl_2$ ZnBr Nitrates d'alcali Sulfocyanates d'alcali Bases Hydroxydes d'alcali	(ASHRAE2009)

Tableau(III). 1 : Couples réfrigérant-absorbant pour les installations d'absorption.

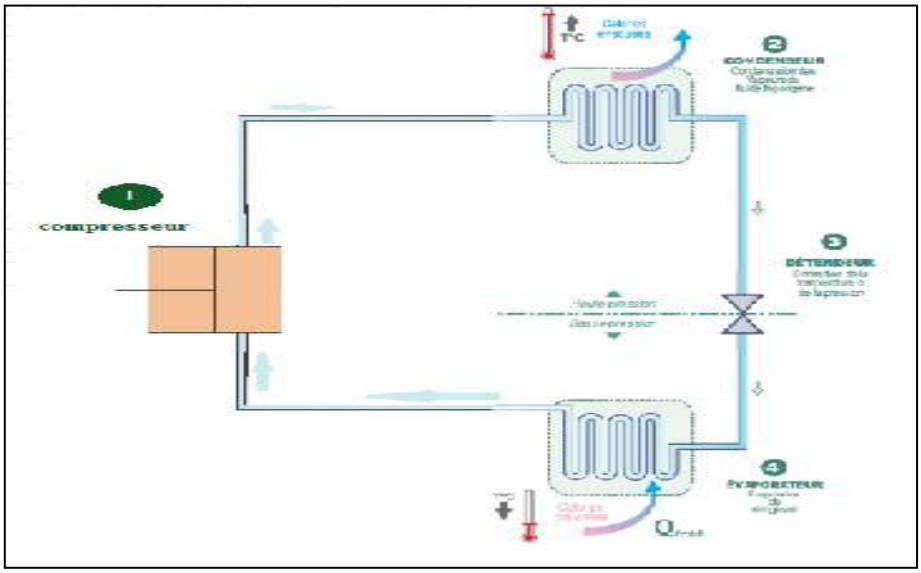
III-7-Analogie entre un system de réfrigération à absorption et un system frigorifique à compression mécanique :

-System de réfrigération à absorption thermique :



Figure(III). 7: System de réfrigération à absorption thermique.

-System frigorifique à compression mécanique :



Figure(III). 8: System frigorifique à compression mécanique.

III-8-Comparaison entre deux systèmes de production de froid :

Le tableau ci-dessous résume les avantages et les inconvénients de deux systèmes de réfrigération [20]:

	Avantages	Inconvénient
Absorption	✓ Pas de vibrations, silence de fonctionnement. ✓ Grand robustesse, car pratiquement pas de pièces tournantes. ✓ Faible coût de fonctionnement. ✓ Disponibilité du matériel. ✓ Source de chaleur possible à partir de capteurs solaires thermiques.	✓ Faible cop. ✓ Plage réduite de variation de la température de l'eau refroidie. ✓ Encombrement important. ✓ Coût élevé d'investissement. ✓Temps de réponse long. ✓Pas de froid négatif avec l'eau. ✓ Risque de cristallisation du LiBr.
Cycle à compression	✓ Très bon cop (2-4). ✓ Mise en fonctionnement rapide. ✓ Rejet thermique limité. ✓ Encombrement réduit par kW de froid produit. ✓ Grande plage de variation de la température d'eau refroidie.	✓ Vibration et bruits. ✓ Compresseur trop coûteux en énergie électrique. ✓ Réfrigérant nocifs pour l'environnement.

Tableau(III). 2 : Comparaison entre deux installations de production de froid.

Conclusion :

Dans le présent chapitre, une présentation détaillée de la climatisation solaire avec modélisation mathématique. Nous avons donné aussi une comparaison non détaillée avec un autre system de climatisation nous avons résumé toutes ces technologies avec leurs avantages et inconvénients. Et on donne les résultats de cette modélisation on le chapitre suivante.

"Chapitre IV"

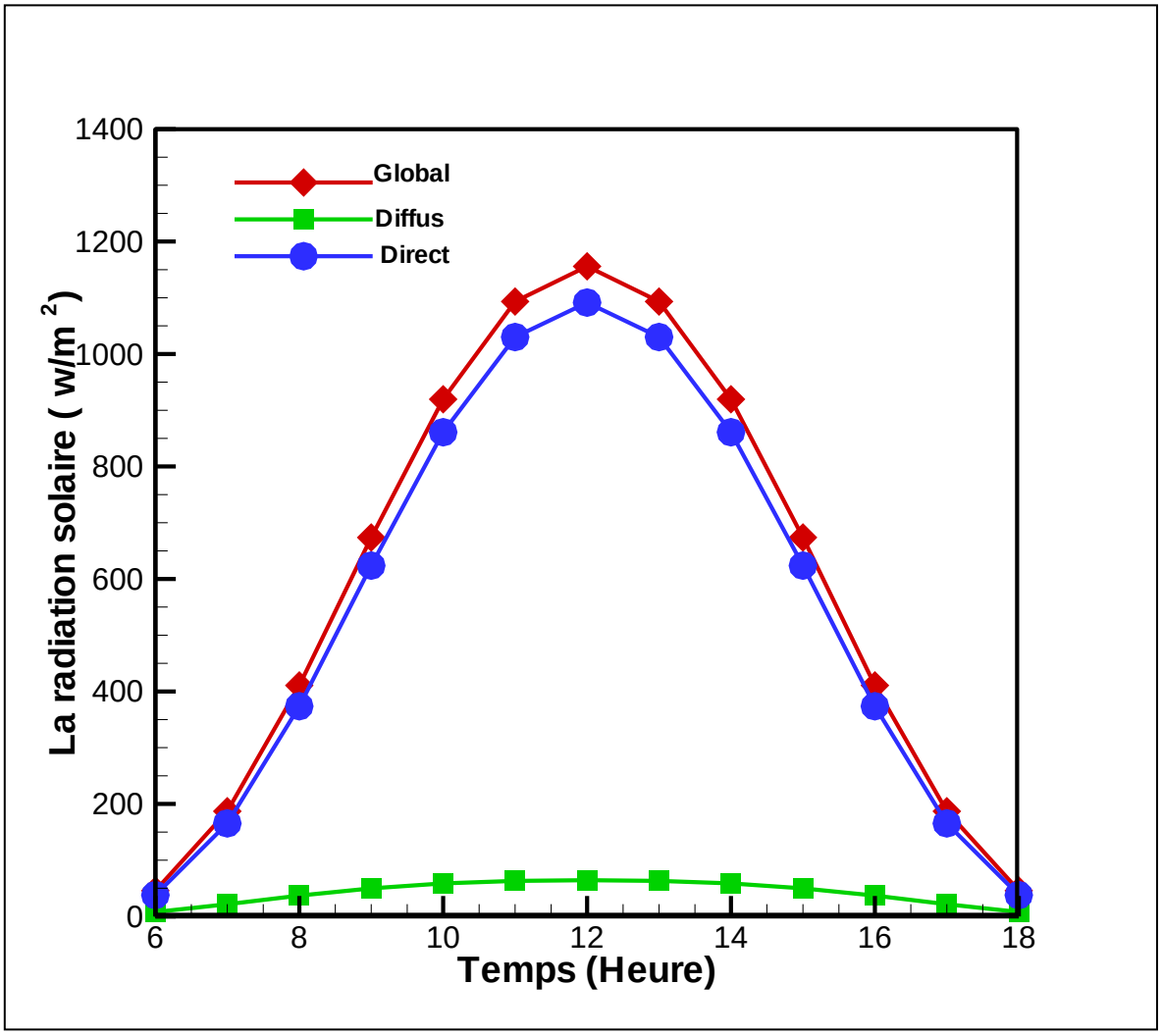
Résultats et interprétation

Chapitre IV : Résultats et interprétation

VI-1 Gisement solaire :

a - Les rayonnements solaires journalières :

Dans ce cas nous avons calculés le rayonnement solaire au 1 Juin pour le site de Médéa :

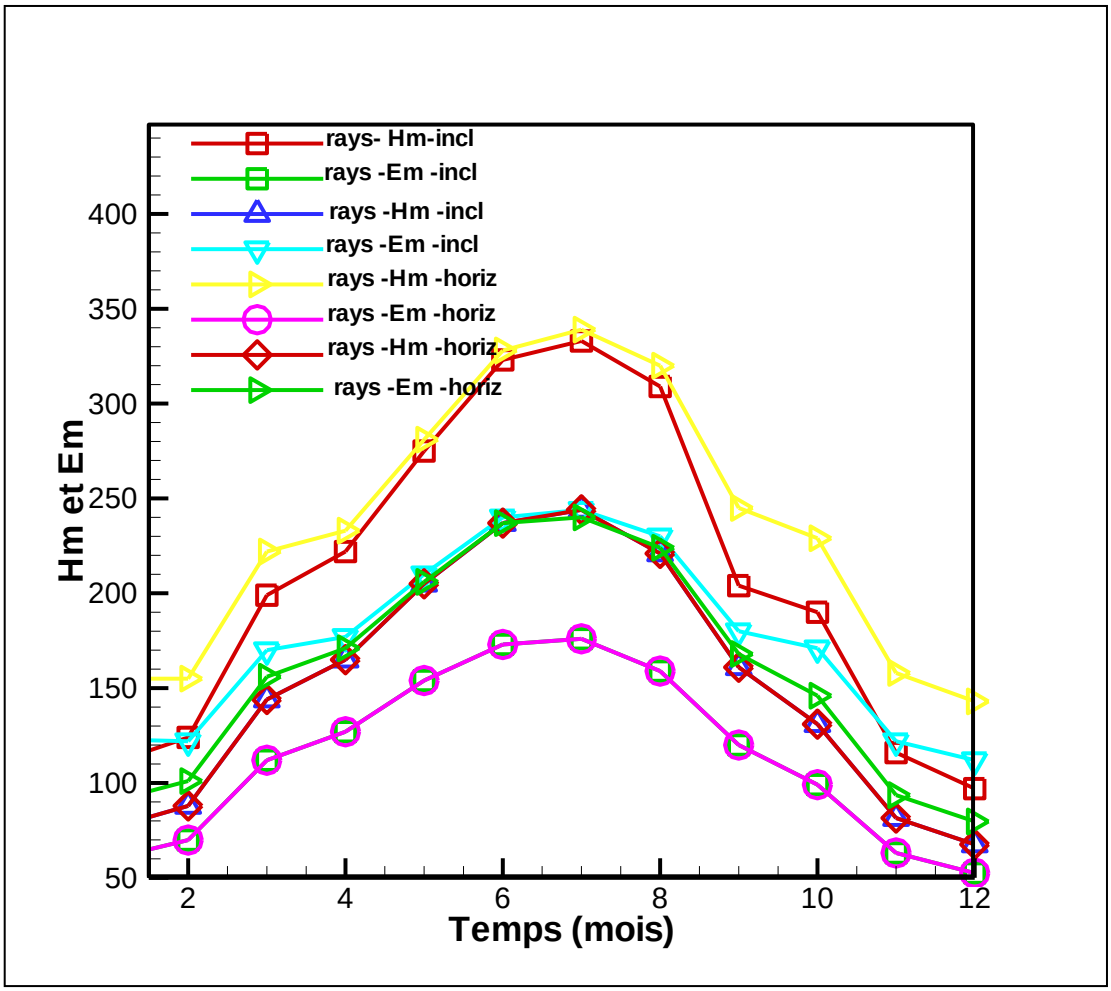


Figure(IV). 1: Variation de radiation solaire journalière.

On représente dans ce schéma l'intensité de la radiation solaire (global, direct et diffus) exprimé en w/m2 pour une journée.

D'après la figure (IV)-1, nous remarquons que la radiation solaire varie au cours de la journée. Elle est faible au voisinage du lever et de coucher du soleil et elle atteint le maximum au milieu de la journée.

b-Evolution des rayonnements solaires annuels :



Figure(IV). 2: Variation des rayonnements solaires annuels.

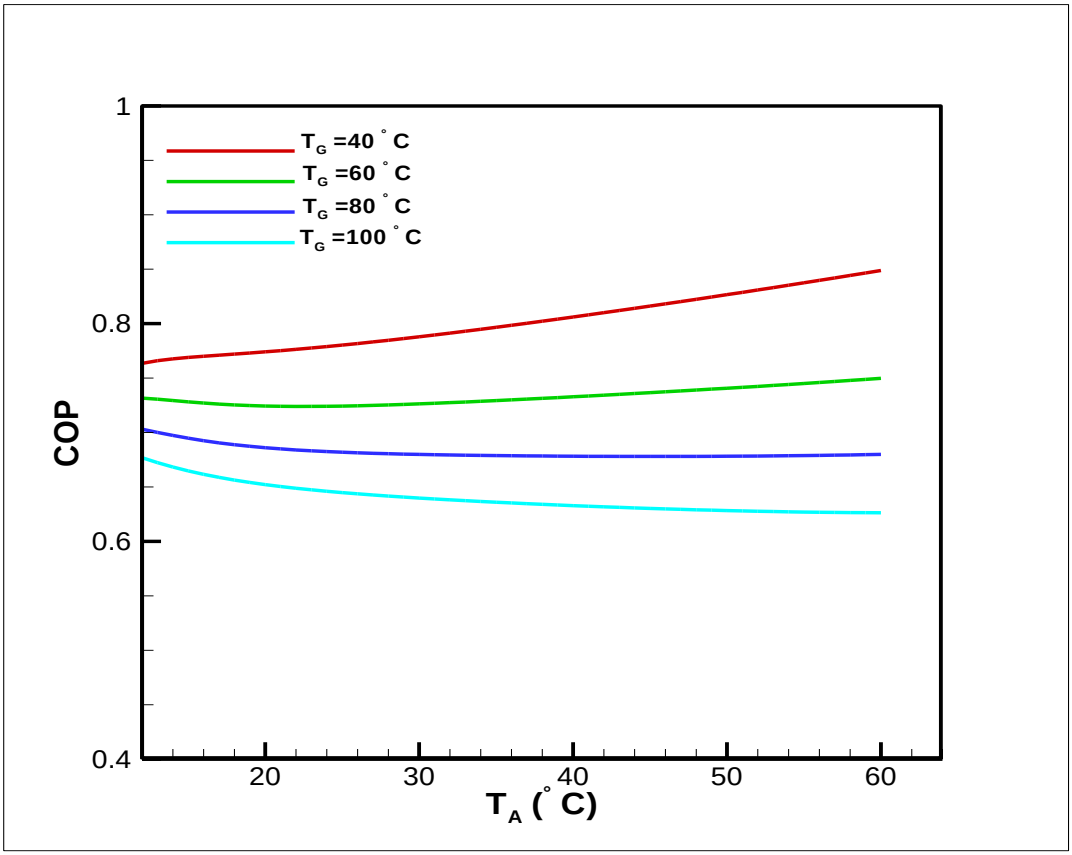
La figure IV.2 montre l'évolution annuelle de l'intensité de la radiation solaire exprimée en kwh/m^2.

D'après la figure IV.2, nous remarquons que la radiation solaire varie au cours de l'année. Elle est faible au début et la fin d'année (Janvier, Février, Mars, octobre, Novembre et Décembre) elle atteint son maximum autour des mois (Juin, Juillet et Aout) au milieu.

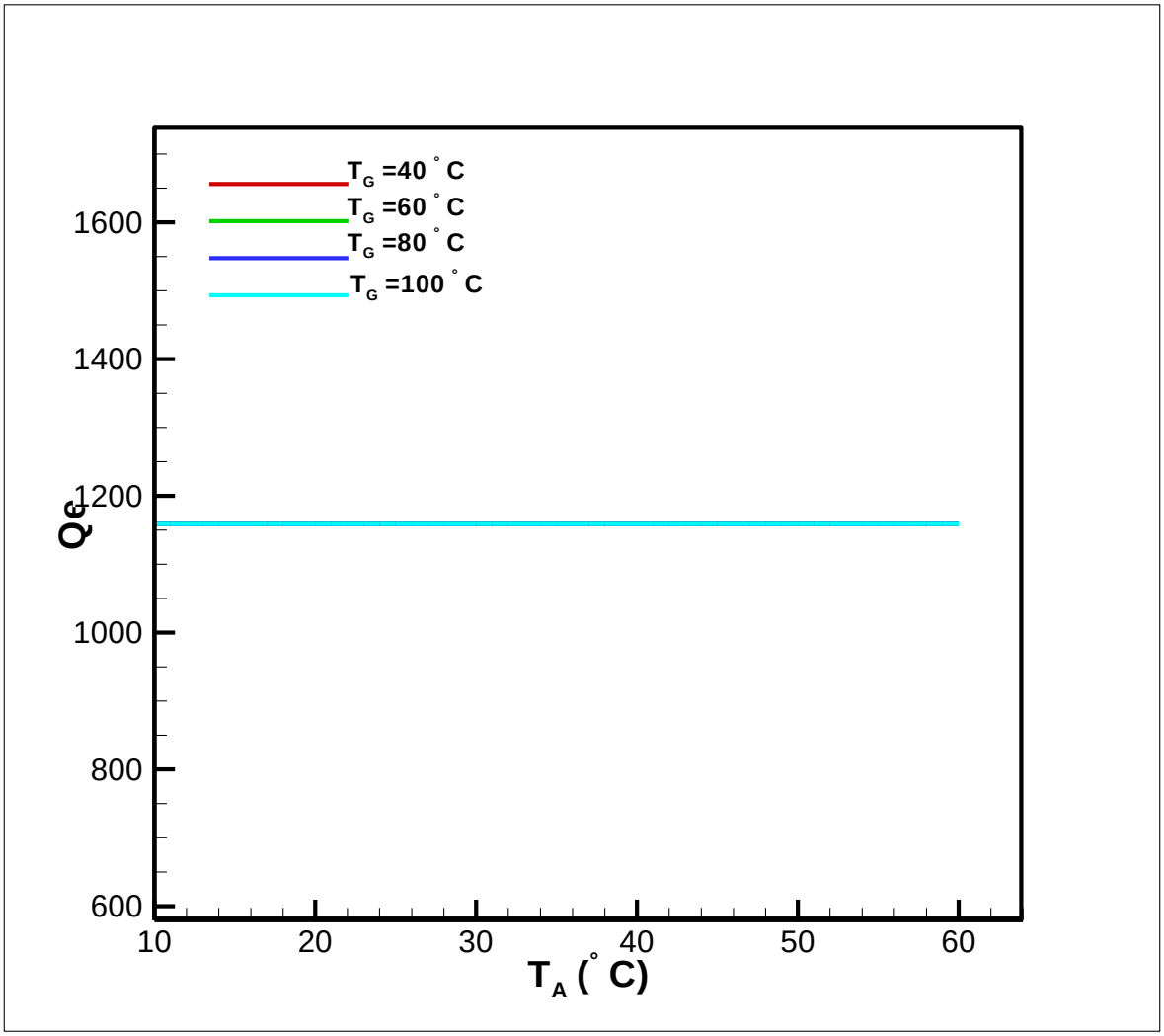
IV-2 simulation numérique de cycle de l'ammoniaque :

1-L'influence de la température de l'absorbeur :

Dans notre étude, la machine à absorption est à simple effet utilisant le couple binaire NH_3/H_2O avec un échangeur interne entre la solution diluée sortant de l'absorbeur et la solution concentrée sortant du générateur dont l'efficacité est égale à l'unité. La température au niveau de l'évaporateur ainsi que celle du condenseur sont constantes (T_E=5 °C et T_C=30 °C). On fait varier les températures du désorbeur et de l'absorbeur.



Figure(IV). 3: Variation du COP en fonction des Températures d'absorption et de génération.



Figure(IV). 4 : Variation de Qe en fonction des Températures d'absorption et de génération.

Dans la figure ; on représente la variation de la valeur du coefficient de performance (COP) en fonction de la température d'absorption et de générateur.

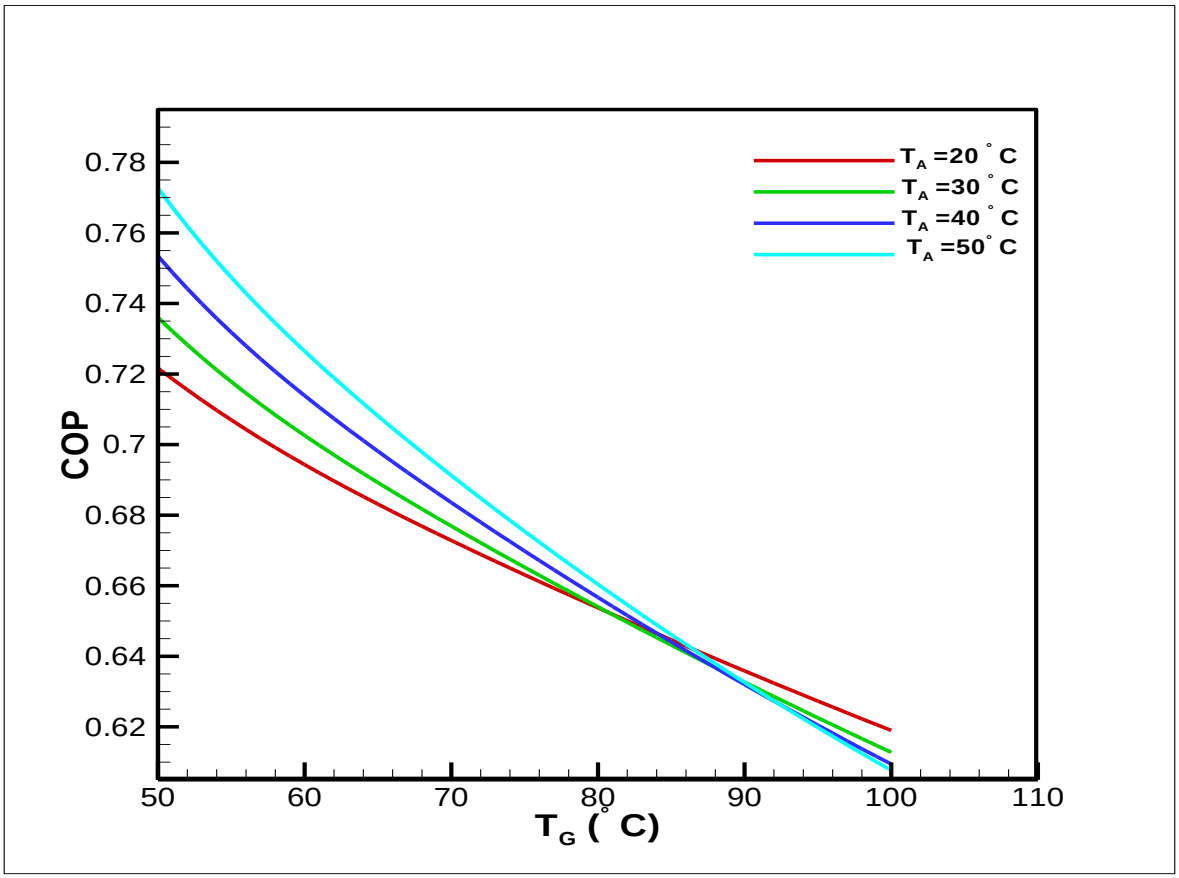
L'interprétation de ces figures fait ressortir que le coefficient de performance diminue avec l'augmentation de la température de générateur quelle que soit la température de l'absorbeur pour une température fixe de l'absorbeur. Le COP augmente avec la diminution de la température du générateur.

Sur le diagramme d'Oldham on remarque que, à pression constante, l'augmentation de la température limite le phénomène de l'absorption et donc, diminue la capacité d'absorption du réfrigérant (ceci correspond à une augmentation de la concentration en LiBr/solution).

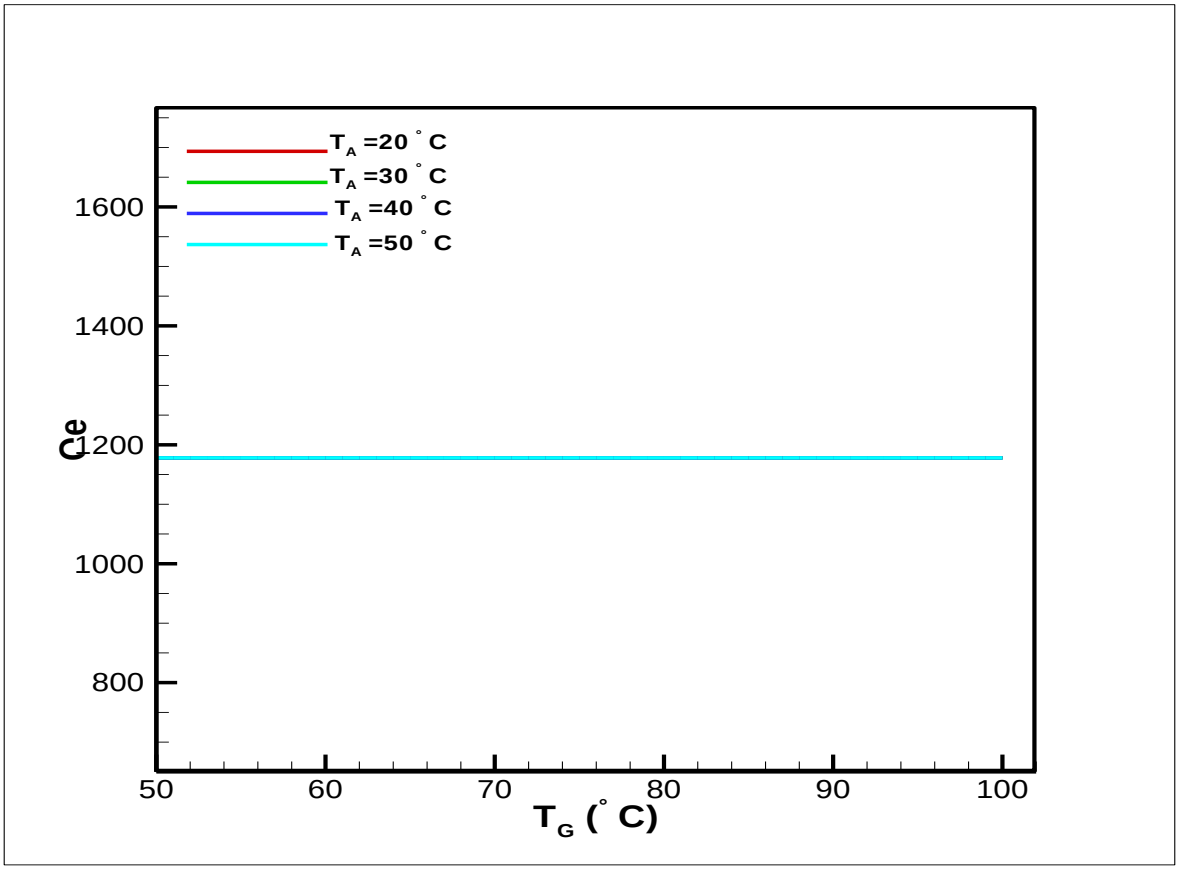
La diminution de la quantité du réfrigérant influe directement sur la puissance frigorifique qui, à son tour influe sur le COP.

2-Influence de la température du générateur :

Pour les mêmes conditions que la partie précédente, ici on représente la variation du COP en fonction des températures de l'absorbeur et du générateur.



Figure(IV). 5: Variation du COP en fonction des Températures de générateur et de l'absorption.



Figure(IV). 6: Variation de Qe en fonction des Températures de générateur et de l'absorption.

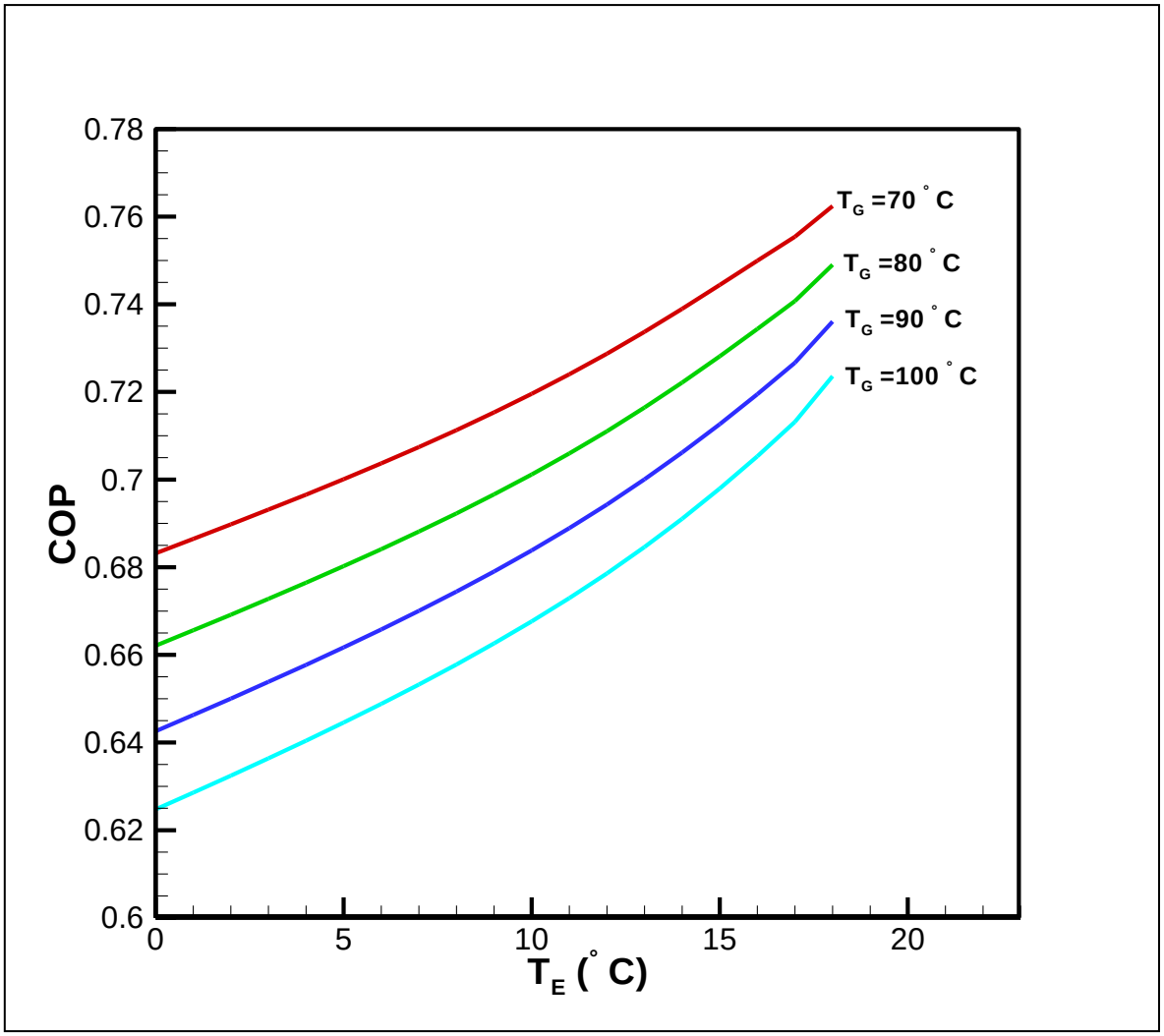
La lecture des figures montre que le COP diminue avec l'augmentation de la température du absorbeur quelques soit la température de générateur.

Cette diminution est plus importante pour les températures élevées du générateur et lorsque les températures de l'absorbeur sont basse.

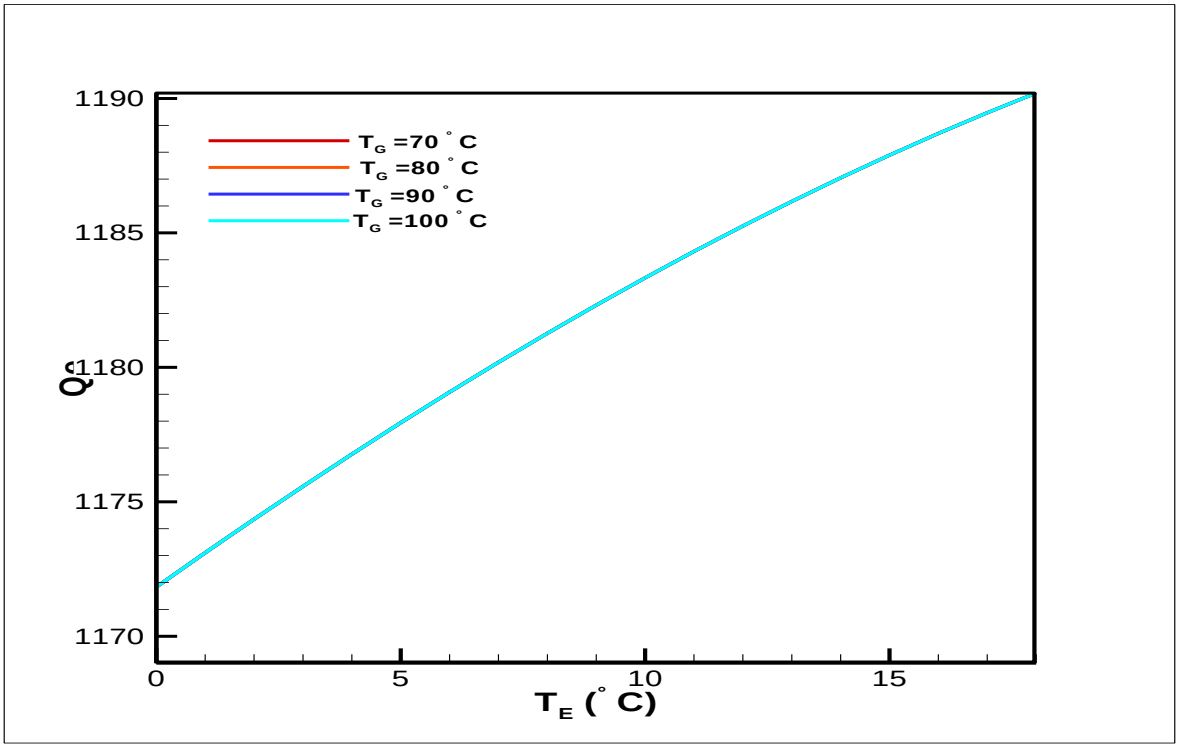
3-L'influence de la température d'évaporation :

Dans cet exemple, on prend la même installation avec une température de l'absorbeur égale à Ta = 10℃ et une température de condensation égale à Tc = 20℃.

On analyse la variation du COP en fonction des températures d'évaporation et de génération.



Figure(IV). 7: Variation du COP en fonction des températures d'évaporation et de génération.



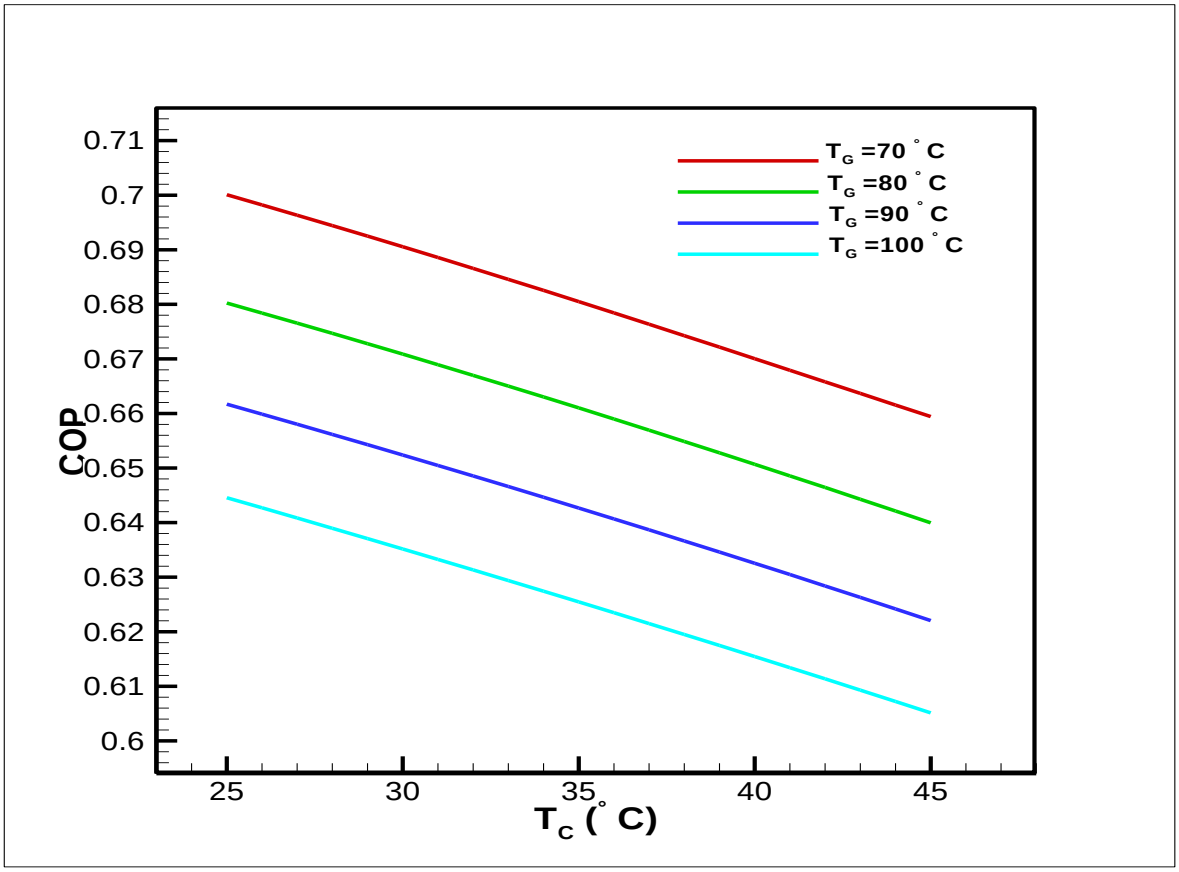
Figure(IV). 8: Variation de Qe en fonction des températures d'évaporation et de génération.

L'interprétation de figures montre ce qui suit :

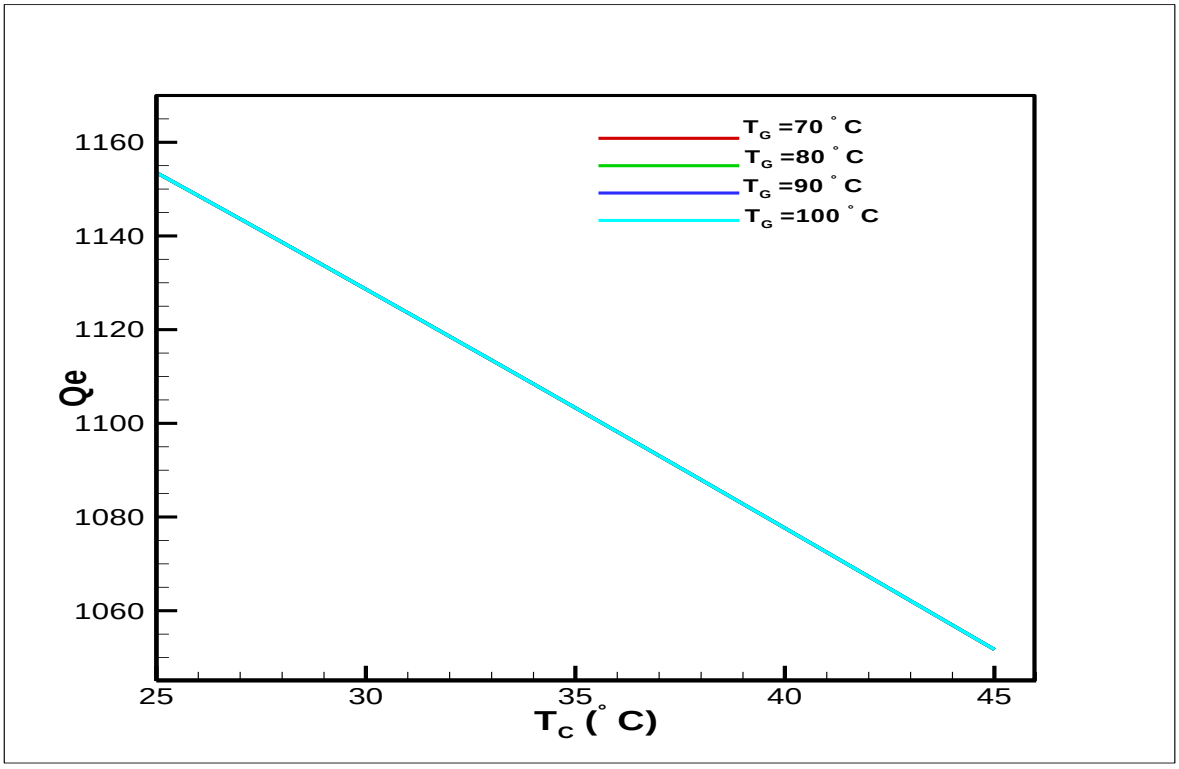
L'augmentation du coefficient de performance et la quantité de chaleur avec 'augmentation de la température d'évaporation quelques soit la température du générateur. Ceci est expliqué par le fait que lorsque la température d'évaporation augmente, le besoin en froid diminue ce qui conduit à une consommation moindre et donc à une efficacité supérieure.

4-L'influence de la température de condensation

Dans cette application, on conserve les valeurs des températures d'évaporation et d'absorption constantes (respectivement T_E =05℃ et Ta= 30℃).On fait varier les températures du générateur et de condensation.



Figure(IV). 2: Variation de COP en fonction des températures de condensation et de génération.



Figure(IV). 3: Variation de Qe en fonction des températures de condensation et de génération.

La figure montre que la variation du coefficient de performance est fonction décroissante avec l'augmentation de la température de condensation. Cette diminution du COP est expliquée par la difficulté de génération du vapeur dans le générateur à cause de l'augmentation de la pression.

Conclusion :

Dans le présent chapitre on présente les résultats d'exécutions de la mise en œuvre de la partie production d'énergie solaire et des besoins plus élevés en refroidissement du système, liés à l'utilisation de groupes de froid à absorption (COP plus faible).

"conclusion générale"

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une étude thermique d'une installation de réfrigération solaire par absorption.

L'énergie solaire reçue au sol est fortement influencée par les paramètres géographiques, astronomiques, et météorologiques. Ces derniers ont un caractère aléatoire ce qui a conféré des dispersions multiples aux résultats obtenus par les différents modèles d'investigations.

De nos résultats, nous pouvons dire qu'il est possible de convertir le rayonnement solaire à un système de climatisation de confort ou de réfrigération.

Un capteur solaire fixe reçoit le maximum d'énergie lorsqu'il est orienté vers le sud et est incliné selon un angle pratiquement égal à la latitude du lieu.

La réfrigération solaire permet d'économiser certainement une quantité substantielle de la consommation d'énergie primaire.

Cela réduit la production de dioxyde de carbone et les pics de consommation d'électricité en été, qui est un avantage important pour l'environnement et l'économie national. Mais quand il s'agit de bénéfice financier, la situation n'est pas aussi encourageante.

La machine à absorption reste le meilleur modèle de production de froid qui, couplé au panneau solaire thermique donnera des résultats meilleures : Absence de vibrations, silence de fonctionnement, grande robustesse (pratiquement pas de pièces tournantes), faible coût de fonctionnement et aussi disponible, et ceci malgré son faible COP.

Bibliographie

[1] R.Bernard, G.Menguy, M.Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique et application. Technique et Documentation, Paris, 1979

[2] J.E .Braun et J.C .Mitchell, Solar geometry for fixed and tracking surface. Solar Energy, vol.31.N°.pp394-444 ,(1983).

[3] B.Y.H.Liu et R.C. Jordan, The interrelationship and characteristic distribution of distribution of direct, diffuse and total solar radiation, Solar Energy, 4,pp 1-19, 1960.

[4] Hay, J.E., Davies, J.A., Calculation of The Solar Radiation Incident on An Inclined Surface, Proceedings First Canadian Solar Radiation Workshop, pp. 59-72, (1980).

[5] M.Kayouche, systéme de poursuite du soleil, bilan énergétique et optimisation de réglage. Thèse de Magister. Université de Constantine ,1996 .

[6] D. Kedwards, L.Marlot, Capteurs Solaires, Edition S C M, Paris 1979.

[7] A. Mefti; M.Y Bouroubi; H. Mimouni, Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, décembre 2002.

[8] P. Rivet, Le Rayonnement solaire ; CNRS.

[9] J.A Duffie and W.A Beckman, Solar Energy of Thermal Processes; 2nd edition, Wiley Interscience, New York, 1974.

[10] M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.

[11] Braun, J.E. et Mitchell, J.C., Solar Geometry for Fixed and Tracking Surfaces, Solar Energy 1983.

[12] Markvart, T. (ed.), Solar Electricity, 2nd edition, John Wiley & Sons, 2000.

[13] Royer, J., Djiako, T., Schiller, E. et Sy, B.S., Le pompage photovoltaïque : manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français, 56, rue Saint-Pierre, 3e étage, Québec, QC, Canada, , 1998.

[14] Larkeche Ouassila, Modelisation d'une machine frigorifique à absorption : application des equilibres de phases. Thèse de doctorat Université Mentouri de Constantine (2012).

[15] Ettahir AMMARI, Echangeurs de chaleur liés au système de refroidissement solaire à adsorption : Dimensionnement d'un aéroréfrigérant, Thèse master, Université de Biskra(2012).

[16] Document, Fiche explicative détaillée ;Machines frigorifiques à sorption :www.machine frigorifique.com.

[17] Ahmed Bellagi, Radhouane BEN JEMAA, Etude d'une installation de climatisation solaire, Unité de Recherche en Thermique et Thermodynamique des Procédés Industriels, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Tunisie.

[18] Thibaut VITTE, Le froid solaire par dessiccation appliqué au bâtiment : Proposition d'une stratégie de régulation du système, Thèse de doctorat, Centre de Thermique de Lyon UMR 5008, INSA de Lyon – Université Lyon1 – CNRS.

[19] F. Yettou, A. Malek, M. Haddadi et A. Gama, Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie, Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2 (2009) 331 – 346.

[20] Guendouz Bouhelal, L'utilisation de L'énergie soLaire pour Les besoins de la climatisation, Thèse MAGISTER, Université de Tlemcen(2011).