

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENTSUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DEM'SILA



Faculté des Sciences de la technologie
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Licence

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

THEME

Etude d'un distillateur solaire

Réalisé Par :

-Boughlam Mohamed Amine

-Benyounes Aymen

Proposé et dirigé par :

M^{me} Benkherbache S

Année Universitaire 2020 /2021

Remerciements

Tout d'abord, merci pour le grand Dieu qui nous a donné la volonté et le courage pour achever ce travail.

Nous exprimons nos remerciements les plus chaleureux et nos respectueuses gratitudees aux professeurs et aux maîtres de conférences à l'Université Mohammed Boudiaf M'SILA pour leurs encouragements, et les conseils précieux tout le long du travail.

Nous remercions notre encadreur Mme Benkherbache S, d'avoir accepté de nous faire l'honneur de diriger ce travail.

Nous remercions également tous les étudiants de notre option énergétique. Et notre estime envers tous les enseignants du département de Génie Mécanique.

On dédie ce travail à nos chers parents, à nos frères et sœurs et à nos chers amis.

SOMMAIRE

Introduction

Chapitre I : Connaissances générales sur les techniques de dessalement.

I.1.) Introduction.....	8
I.2.) Le dessalement.....	9
I.2.1.) Les procédés de dessalement.....	9
I.2.2.) Procédés de dessalement conventionnels industrialisés.....	10
I.3.) Procédés conventionnels les plus utilisés.....	10
I.3.1.) L'osmose inverse.....	10
I.3.2.) Principe de l'osmose inverse.....	11
I.3.3.) Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse.....	12
I.4.) Les procédés de distillation.....	13
I.4.1.) Le procédé de distillation à détente étagée (Multi-Stage Flash distillation MSF).....	14
I.4.2.) Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED).....	15
I.4.2.1.) Electrodialyse.....	19
I.4.2.2.) Généralités.....	19
I.4.2.3.) Principe.....	20
I.4.3.) Procédés non conventionnels.....	20
I.4.4.) La distillation membranaire.....	20
I.4.4.1.) Présentation.....	20
I.4.4.2.) Avantages et inconvénients.....	22
I.4.5.) Procédés de distillation.....	23
I.4.5.1.) Présentation.....	23
I.4.5.2.) La distillation thermique.....	23
I.4.5.3.) Distillation par compression de vapeur.....	26

Chapitre II : Étude théorique du distillateur solaire.

II.1.) Le distillateur solaire.....	28
II.1.1.) Les différents types de la distillation solaire.....	28

II.2.) Les paramètres influant du système de la distillation.....	36
II.2.1.) Les paramètres externes.....	37
II.2.1.1.) Les paramètres météorologiques.....	37
II.2.1.2.) Les paramètres géographiques.....	37
II.2.2.) Les paramètres internes.....	37
II.2.2.1.) Les paramètres de position.....	37
II.2.2.2.) Les paramètres de construction.....	38
II.2.2.3.) Les paramètres optiques.....	39
II.2.2.4.) Les paramètres thermo physique.....	39
II.2.2.5.) Les paramètres de fonctionnement.....	40
II.3.) Caractéristiques de fonctionnement.....	40
II.3.1.) Le rendement.....	40
II.3.2.) Les efficacités internes et globales.....	40
II.3.3.) La performance.....	40
II.4.) Bilan énergétique dans un distillateur simple.....	42
II.4.1.) Échange de chaleur à l'intérieur du distillateur.....	42
II.4.2.) Échange de chaleur à l'extérieur du distillateur.....	42
II.4.3.) Modélisation mathématiques.....	42
II.4.4.) Expression des différents coefficients de transfert de chaleur.....	46

La liste des figures :

Chapitre I :

Figure I.1 : Osmose et osmose inverse.....	11
Figure I.2 : Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse.....	12
Figure I.3 : Principe de fonctionnement d'un système par détente successives.....	15
Figure I.4 : Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED)	16
Figure I.5 : Schéma de principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur.	18
Figure I.6 : Évolution de la température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression.....	19
Figure I.7 :	20
Figure I.8 : Principe de la distillation membranaire [6].....	22
Figure I.9 : Dessalement par distillation suivant le procédé de Saint-Basile au milieu du IV ^e siècle après J-C.[3].....	23
Figure I.10 : Distillation à multiples effets [3].....	24
Figure I.11 : Distillation Flash [7].....	25
Figure I.12 : Distillation avec compression de vapeur [7]	26
Figure I.13 : Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire plan à effet de serre.....	27
Chapitre II :	
Figure II.1 : Principe pompage de surface.....	29
Figure II.2 : Principe pompage de surface avec surpresseur.....	30
Figure II.3 : Principe pompage immergé.....	30
Figure II.4 : Système de pompage type.....	31
Figure II.5 : Schéma représentant le mécanisme de transfert de chaleur vers l'alimentation se trouvant à l'intérieur de l'ustensile de cuisine dans un simple cuiseur solaire boîte.....	33
Figure II.6 : Schéma montrant la forme de la plaque absorbante à ailettes.....	34
Figure II.7 : Schéma représentant les éléments constituant le modèle du cuiseur solaire étudié.....	35
Figure II.8 : Schéma représentant les différents échanges thermiques mis en jeu.....	35
Figure II.9 : La pyramide distillateur.....	36

Figure II.10 : Photo du capteur.....	39
Figure II. 11 : Schéma de l'absorbeur	39
Figure II. 12 : Bilan énergétique d'un distillateur solaire.....	43

Introduction générale :

L'eau est une substance essentielle à la survie et au développement de l'humanité. Pourtant, elle fait partie des substances qui courent un danger. Que va devenir cette fragile ressource ?

Sur le plan mondial, la question de l'approvisionnement en eau devient chaque jour de plus en plus préoccupante. Le constat unanimement partagé est que : déjà précaire dans certaines régions du globe, la situation risque de s'empirer dans les années à venir.

Le formidable essor démographique que notre planète va, en effet, connaître dans les vingt-cinq prochaines années vont nécessairement s'accompagner d'une explosion de la consommation en eau et d'une dégradation de sa qualité. Cela risque de mettre en péril l'approvisionnement en eau douce pour la grande partie de l'humanité et par conséquent d'aggraver les conflits entre pays voisins ayant des ressources communes.

Notre travail, ici, consiste à étudier les différents constituants d'un distillateur solaire. Pour cela, nous allons commencer par des connaissances générales sur les techniques de dessalement ensuite une étude théorique du distillateur solaire .

Chapitre I

Connaissance générale sur les techniques de dessalement.

Ce chapitre est consacré à une présentation des connaissances générales sur les techniques de dessalement et surtout la distillation solaire et ses différents types les plus apportés par les pays.

I.1.)Introduction :

L'eau est abondante sur terre, elle représente 1380 millions de km³. L'essentiel toutefois est constitué d'eau de mer (97,2 %) et de glace (2,15 %) inutilisables directement. L'eau douce, facilement disponible (lacs, fleuves, certaines eaux souterraines), ne représente que 0,07 % de la ressource totale soit environ un million de km³. Mais la répartition de cette eau est très inégale. En effet, dix pays se partagent 60 % des réserves d'eau douce et vingt-neuf autres principalement en Afrique et au Moyen-Orient, sont au contraire confrontés à une pénurie chronique d'eau douce. Dans ces pays, selon le Water Resources Institute, 250 millions d'individus, ne disposent pas aujourd'hui du minimum vital d'eau défini à 1000 m³ par habitant et par an. 400 millions de personnes vivent en situation de stress hydrique, estimé entre 1000 et 2000 m³ par habitant et par an. Et on estime que 2,5 milliards de personnes pourraient souffrir du manque d'eau en 2050 compte-tenu de l'évolution de la démographie et de l'augmentation des consommations d'eau.

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable devront être mises en place pour satisfaire les besoins de la population croissante. Une

des techniques prometteuses pour certains pays est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Les techniques de dessalement de l'eau de mer sont opérationnelles depuis de nombreuses années. Mais leur coût (de 1 à 2 euros / m³) limite souvent leur utilisation aux pays riches. Cependant dans les dernières années, la capacité des usines de dessalement s'est fortement accrue et les coûts de production par m³ ont connu une forte diminution.[1]

I.2.) Le Dessalement

Le dessalement de l'eau (également appelé dessalage ou désalinisation) est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce (potable ou, plus rarement en raison du coût, utilisable pour l'irrigation) à partir d'une eau saumâtre ou salée (eau de mer notamment).

Très généralement, il est plus simple et plus économique de rechercher des sources d'eau douce à traiter (eaux de surface, telles que lac et rivière, ou eau souterraine), que de dessaler l'eau de mer. Cependant, dans de nombreuses régions du monde, les sources d'eau douce sont inexistantes ou deviennent insuffisantes au regard de la croissance démographique ou de la production industrielle.

D'autre part, il est souvent rentable de combiner la production d'eau douce avec une autre activité (notamment la production d'énergie, car la vapeur disponible à la sortie des turbines, et perdue dans une usine classique, est réutilisable dans une station de dessalement dite thermique ou fonctionnant sur le principe de l'évaporation).

L'eau de mer a une salinité d'environ 35 g/L, avec des variations régionales significatives (42 g/L dans le golfe Persique). Pour séparer le sel, il faut, d'un point de vue purement théorique et sans perte d'énergie (dessalement isentropique), environ 0,56 kWh/m³.

Les systèmes de dessalement se caractérisent par leur rendement et le taux de sel résiduel (saumure).

Dans le monde, on produit chaque jour 95 millions de mètres cubes d'eau douce en 2018, rejetant 141,5 millions de m³ par jour de saumure, dont l'impact sur les zones de rejet inquiète les experts scientifiques de l'ONU. [2]

I.2.1.) Les Procédés de dessalement

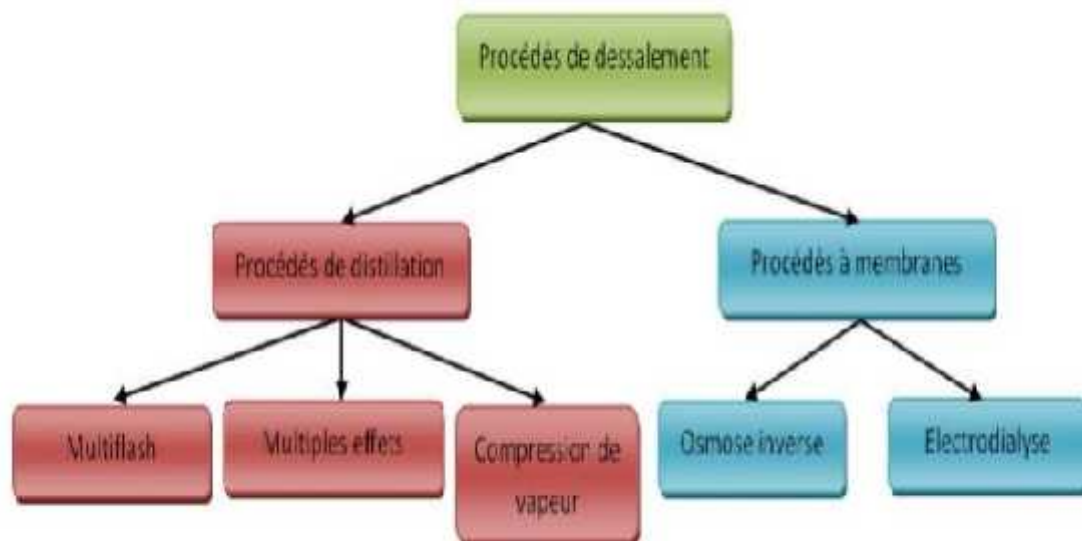
Divers procédés de dessalement existent pour dessaler l'eau de mer et les eaux saumâtres mais beaucoup ne sont pas encore passés à l'échelle industrielle.

On distingue :

- les procédés avec changement de phase (distillation, congélation, extraction par formation d'hydrates solides...)
- les procédés avec utilisation de membranes (électrodialyse, osmose inverse, procédé osmo-ionique...)
- les procédés agissant sur les liaisons chimiques (échange d'ions, extraction par solvants sélectifs...)

Le schéma suivant présente les procédés de dessalement les plus utilisés:[3]

I.2.2.) Procédés de dessalement conventionnels industrialisés



Il existe donc des procédés conventionnels (distillation thermique, osmose inverse, électrodialyse,...) et d'autres procédés qui sont non conventionnels (distillation solaire, congélation, marais salants, cristallisation,...). Ces procédés sont présentés ci-dessous:

I.3.) Procédés conventionnels les plus utilisés:

I.3.1.) L'osmose inverse :

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous, les molécules organiques de 10-7 mm de taille.

L'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement celle électrique consommée principalement par les pompes haute pression.

La teneur en sels de l'eau osmose est de l'ordre de 0,5 g.L-1.

I.3.2.) Principe de l'osmose inverse :

On appelle osmose le transfert de solvant (eau dans la plupart des cas) à travers une membrane semi-perméable sous l'action d'un gradient de concentration.

Soit un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes (figure 1). Le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera. Si, pour simplifier, nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique.

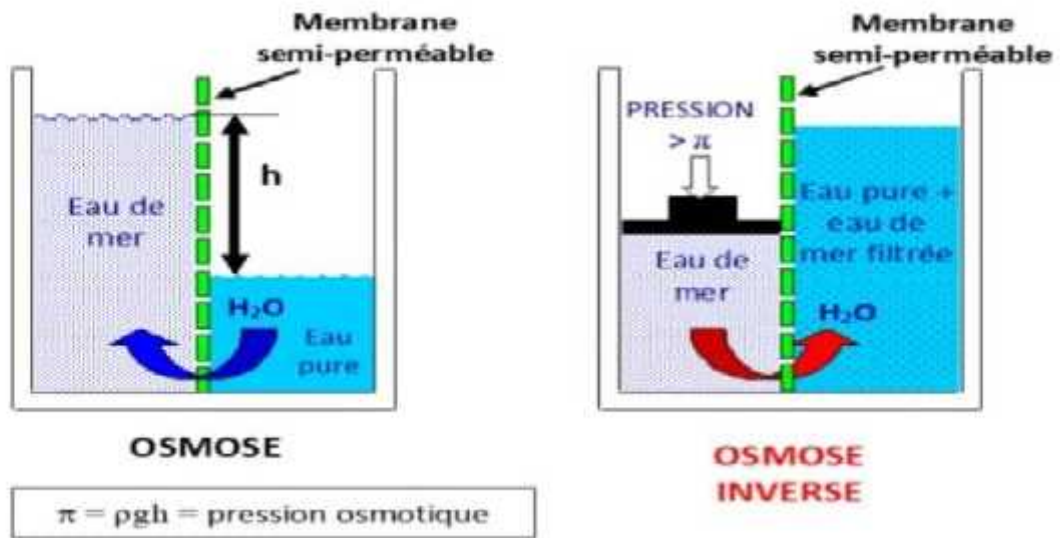


Figure 1 - Osmose et osmose inverse

Une augmentation de la pression au delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique (voir figure 1), c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est le phénomène d'osmose inverse.

Pour les solutions suffisamment diluées, la pression osmotique notée π peut être calculée d'après la loi de Van't Hoff :

$$\pi = i \times C \times R \times T, \text{ où :}$$

- i est le nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte,
- C est la concentration en sels en mol.m^{-3}
- R est la constante des gaz parfaits $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- T est la température absolue de la solution en Kelvin.

I.3.3.) Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse :

Les éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse sont schématisés sur la figure 2.

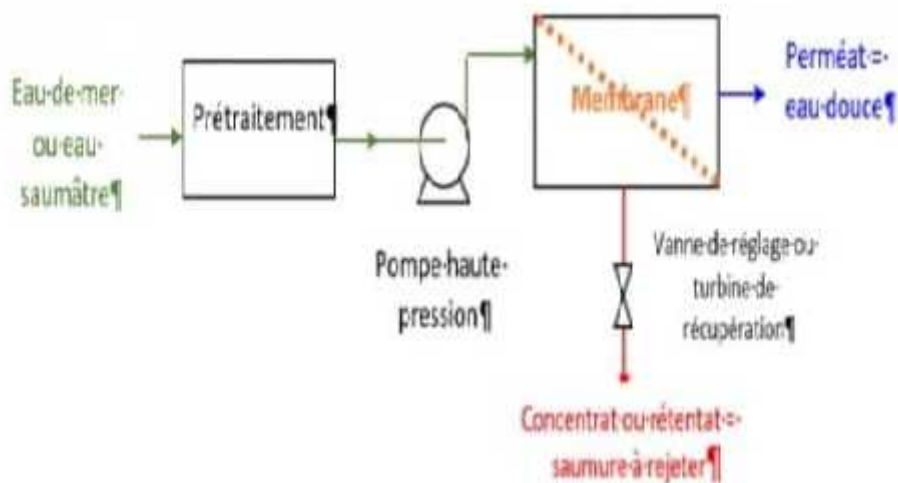


Figure 2 - Eléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse

Le dessalement par osmose inverse nécessite d'abord un pré-traitement très poussé de l'eau de mer pour éviter le dépôt de matières en suspension sur les membranes qui conduirait très rapidement à une diminution des débits produits.

Il est nécessaire de retenir toutes les particules de dimension supérieure à 10 à 50 μm selon le type de module d'osmose inverse. Ceci est réalisé à l'aide d'une pré filtration grossière puis d'une filtration sur sable pour éliminer les matières en suspension les plus grosses. Puis un traitement biocide et une acidification sont nécessaires pour éviter le développement de microorganismes sur la membrane et éviter la précipitation de carbonates. Enfin une filtration sur cartouches permet de retenir les particules de taille de l'ordre de quelques dizaines de μm qui n'ont pas été retenues par le filtre à sable.

La pompe haute pression permet ensuite d'injecter l'eau de mer dans le module d'osmose inverse dans lequel se trouvent les membranes.

De plus, un deuxième phénomène intervient lors de l'osmose inverse, il s'agit de la polarisation de concentration de la membrane. En effet, au cours du temps, la concentration de la solution salée augmente puisque la majorité des molécules sont retenues d'un seul côté de la membrane. De ce fait, la pression osmotique augmente également près de la couche limite, avec des risques de précipitation des composés à faible produit de solubilité. Pour un même rendement, la pression à appliquer est donc plus élevée. Pour éviter ce phénomène on balaye

la membrane du côté de la solution salée par un flux d'eau continu. Toute l'eau n'est pas filtrée, une partie sert à nettoyer la membrane. Ce procédé est donc semblable à une filtration tangentielle. L'eau non filtrée est appelée retentat tandis que l'eau qui a traversé la membrane est appelée perméat.

Afin de limiter la consommation d'énergie du procédé, on peut placer sur le circuit du rétentat une turbine qui permet de récupérer une partie de l'énergie contenue dans ce fluide sous haute pression.

I.4.) Les procédés de distillation :

Dans les procédés de distillation, il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de condenser cette vapeur pour obtenir de l'eau douce liquide. Il s'agit en fait d'accélérer le cycle naturel de l'eau. En effet l'eau s'évapore naturellement des océans, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations. Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux.

L'inconvénient majeur des procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En effet pour transformer un kg d'eau liquide en 1 kg d'eau vapeur à la même température il faut environ 2250 kilojoules (si le changement d'état se fait à 100 °C). Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point.

Deux procédés se partagent le marché du dessalement thermique : le procédé de distillation à détente étagée (Multi-Stage Flash distillation MSF) et le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED).

I.4.1.) Le procédé de distillation à détente étagée (Multi-Stage Flash distillation MSF).

Ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120 °C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore (voir figure 3) puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour

fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle.

Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à 120 °C, l'eau de mer circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant d'abord par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur d'eau. Elle est finalement portée à 120 °C grâce à de la vapeur à une température supérieure à 120 °C produite par une chaudière ou provenant d'une centrale de production d'électricité.

On remarque lors du phénomène de flash que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un dévésiculeur constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte.

L'avantage principal du procédé MSF est que l'évaporation de l'eau de mer ne se produit pas autour des tubes de chauffe puisque le liquide « flashe » ceci limite les risques d'entartrage.

L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière, cette énergie peut être peu coûteuse si on récupère de la vapeur basse pression à la sortie d'une turbine de centrale électrique. Il faut également fournir de l'énergie électrique pour les pompes de circulation de l'eau de mer.

Le procédé MSF ne permet pas une flexibilité d'exploitation. Aucune variation de production n'est tolérée, c'est pourquoi ce procédé est surtout utilisé pour les très grandes capacités de plusieurs centaines de milliers de m³ d'eau dessalée par jour.

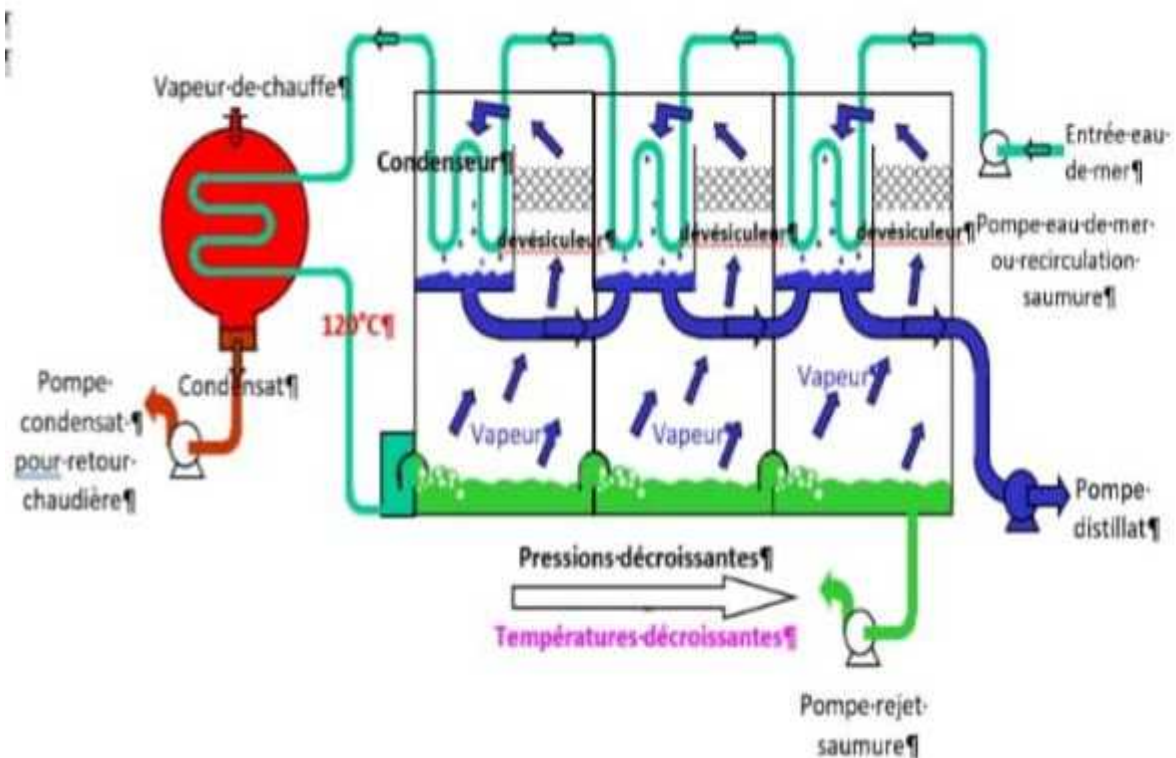


Figure 3 - Principe de fonctionnement d'un système par détentes successives (MSF) à 3 étages

I.4.2.) Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED).

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le 1er effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2ème effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2ème effet et ainsi de suite (voir figure 4). Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m³ d'eau douce produite).

Plusieurs technologies d'évaporateurs multiples effets existent :

- Les évaporateurs multiples effets à tubes horizontaux arrosés sont les appareils les plus utilisés actuellement. Dans ces appareils le fluide de chauffage s'écoule dans les tubes horizontaux tandis que l'eau de mer à évaporer est arrosée de façon à s'écouler sous forme de film le plus uniforme possible sur l'extérieur des tubes. La vapeur produite dans la calandre (enceinte cylindrique qui contient le faisceau de tubes) est ensuite envoyée dans les tubes de l'effet suivant où elle cédera son énergie de condensation. Ces évaporateurs présentent un très bon coefficient d'échange grâce à l'écoulement en film de l'eau de mer. C'est la raison pour laquelle ils remplacent actuellement les plus anciens évaporateurs à faisceau de tubes noyés dans lesquels les tubes étaient plongés dans l'eau de mer.

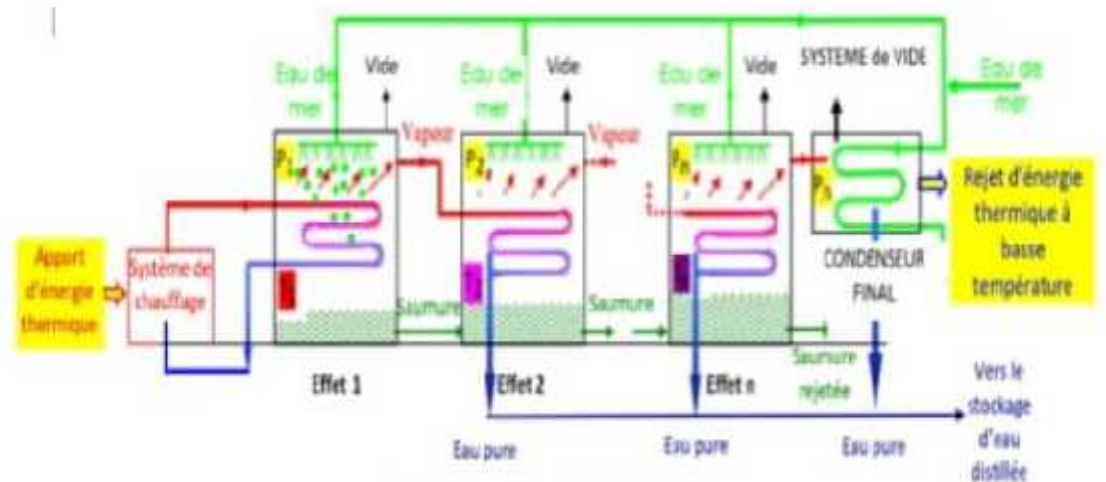


Figure 4 - Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED).

- Des évaporateurs multiples effets à plaques sont également en cours de développement. L'eau de mer à évaporer s'écoule alors sous forme de film mince le long d'une mince plaque métallique chauffée par la vapeur provenant de l'effet précédent qui s'écoule le long de l'autre face de la plaque métallique. De nombreuses plaques entre lesquelles s'écoulent alternativement l'eau de mer et la vapeur de chauffage sont associées en parallèle pour constituer un effet. La vapeur produite est recueillie dans une calandre cylindrique dans

laquelle sont placées les plaques. Cette vapeur est ensuite envoyée entre les plaques situées dans une calandre qui constitue le deuxième effet et ainsi de suite.

Un système compact à bases de plaques EasyMED constitué de cellules élémentaires comprenant une zone d'évaporation et une zone de condensation breveté en 1998 est également en cours de développement. L'agencement judicieux de cellules élémentaires pour que chaque zone d'évaporation se situe entre deux zones de condensation de l'effet précédent permet d'obtenir un appareil plus compact puisqu'il ne nécessite pas une volumineuse calandre pour chaque effet.

L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière produisant le fluide de chauffage pour le premier effet. On peut cependant utiliser des chaleurs résiduelles en couplant le procédé MED à des usines de production d'électricité ou des usines rejetant produisant les eaux résiduelles à des températures de l'ordre de 80 °C. Il faut également de l'énergie électrique pour les pompes de circulation et la production de vide.

Afin de limiter la consommation d'énergie thermique, il est aussi possible d'utiliser la compression mécanique de vapeur. Ceci est possible dans le cas de l'évaporation simple ou multiple effet. La vapeur produite dans le dernier effet ou dans l'effet unique (pour de petites unités) est aspirée par un compresseur. Après compression, la température de saturation de la vapeur haute pression est augmentée. Cette vapeur peut donc être utilisée (elle est envoyée dans les tubes du faisceau tubulaire) pour porter à ébullition l'eau de mer dans l'évaporateur où règne une pression plus faible. La vapeur haute pression est ainsi condensée et se transforme en eau distillée liquide et le cycle se reproduit avec la vapeur produite par l'évaporation partielle de l'eau de mer.

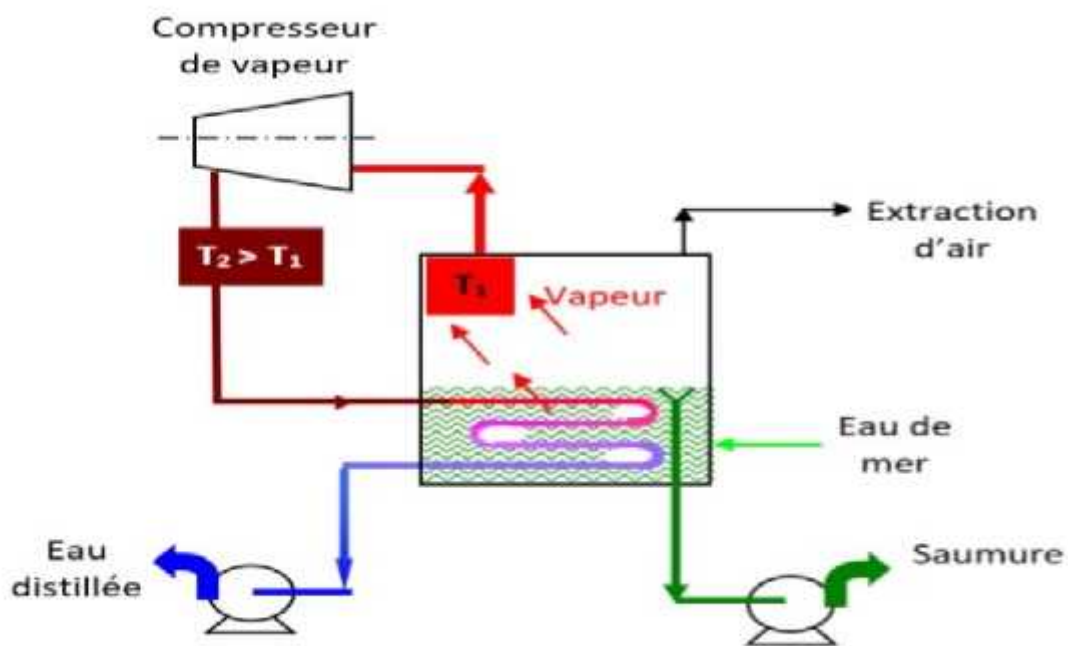


Figure 5 - Schéma de principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur

Dans le procédé MED, l'ébullition de l'eau de mer au sein de chaque cellule (effet) se fait au contact de la surface d'échange de chaleur, il y a des risques d'entartrage dû à la précipitation de sels tels que CaSO_4 ou CaCO_3 dont la solubilité diminue quand la température augmente. Pour limiter ces risques, il faut donc utiliser un traitement à l'acide et limiter la température de tête (du 1er effet ou étage) à moins de $70\text{ }^\circ\text{C}$.

A titre d'information, pour comprendre la nécessité de réduire la pression dans les systèmes multiples-effets ou à détente étagées, la figure 6 donne l'évolution de la température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression. [3]

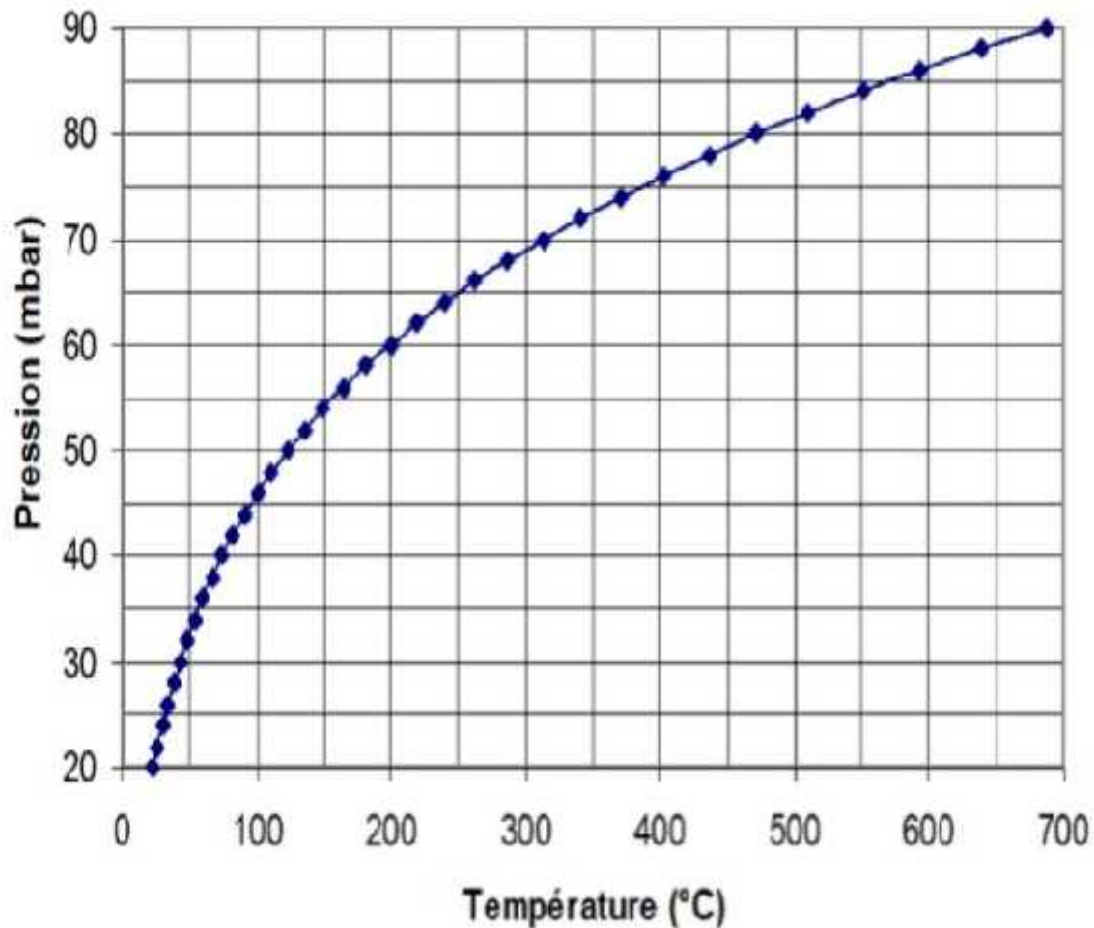


Figure 6 - Évolution de la température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression.

I.4.2.1.) Electrodialyse

I.4.2.2.) Généralités

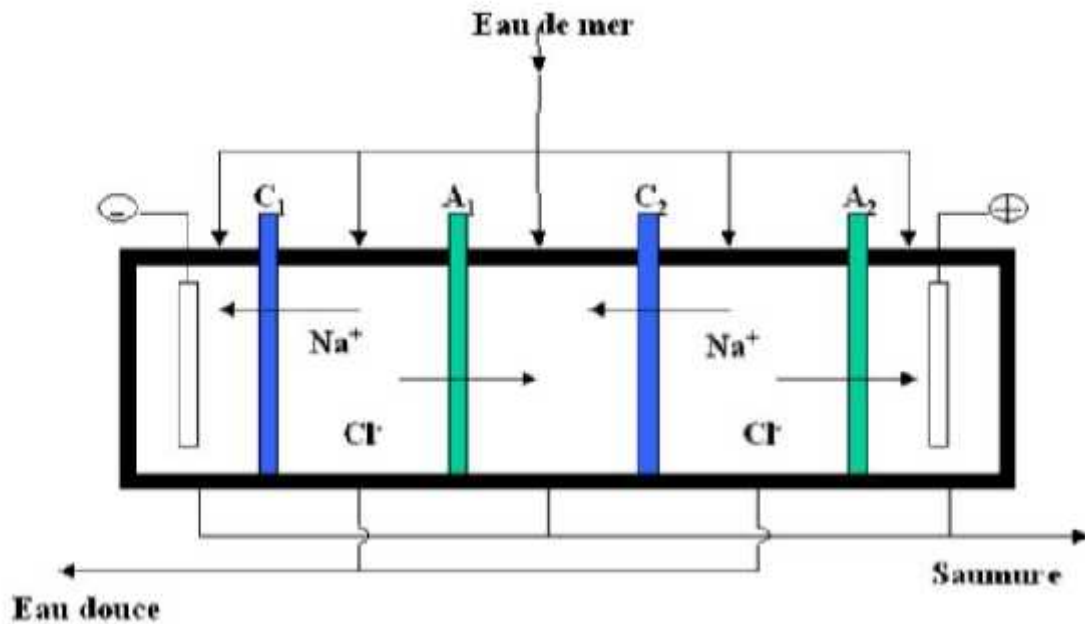
Le terme « électrodialyse » désigne le transfert d'ions à travers des membranes sous l'effet d'un champ électrique

C'est un procédé à membrane très ancien puisque la première application date des années 1960 (d'après Maurel A. 2006). C'est pour faire face à des besoins en eau potable au Japon, en particulier, que l'électrodialyse a été développée en tant que procédé de dessalement de l'eau de mer à l'échelle industrielle. Ce procédé physique permet une réduction de l'impact

environnemental par rapport aux autres procédés de production physico-chimiques, comme l'extraction liquide-liquide, la précipitation ou l'échange d'ions sur résine, plus polluants [4]

I.4.2.3.) . Principe :

Les compartiments sont alimentés par une solution saline (généralement NaCl: Na⁺ et Cl⁻).



Sous l'effet du courant, les cations de la solution saline se dirigent vers la cathode et les anions vers l'anode. Les membranes bleues sont perméables aux cations et les membranes vertes sont perméables aux anions. Dans chaque compartiment, il y aura donc augmentation (compartiment de concentration) ou diminution (compartiment de déminéralisation) de la concentration en ions. Et on obtiendra soit de l'eau douce soit de la saumure.

I.4.3.) .Procédés non conventionnels: ces procédés sont communément moins utilisés comparé à l'osmose inverse et aux procédés de distillation ou bien ne sont pas encore industrialisés:

1. les marais salants
2. la distillation solaire
3. la distillation membranaire
4. la congélation

5. la cristallisation

I.4.4.) .Distillation membranaire :

I.4.4.1.) Présentation :

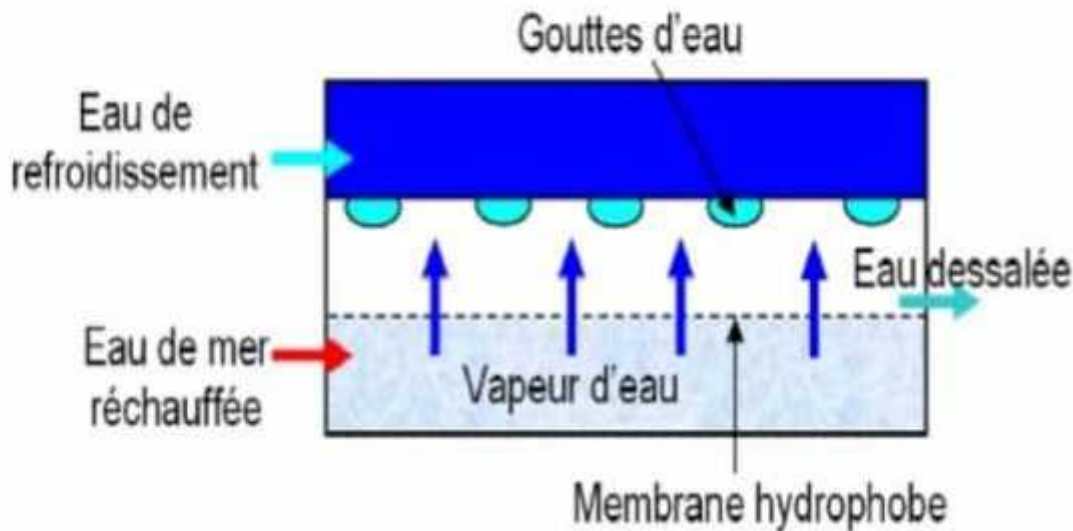


Figure 8 Principe de la distillation membranaire [6]

La distillation membranaire est une technologie émergente mais encore à l'état expérimental. Comme son nom l'indique, il s'agit d'un procédé hybride combinant à la fois le procédé de distillation et un procédé à membrane. La membrane n'a pas le même rôle de séparation que dans le cas de l'osmose inverse par exemple. La force de transfert est la différence de pressions partielles de vapeur d'eau entre les deux côtés de la membrane et non pas la pression totale.

Le principe de ce procédé est le suivant: le gradient de pression de vapeur est créé par le chauffage de l'eau salée côté alimentation ce qui entraîne l'augmentation de sa pression de vapeur et son évaporation au voisinage de la membrane. Seule la vapeur d'eau peut traverser la membrane du fait que celle-ci soit hydrophobe; le liquide ne peut pas pénétrer à l'intérieur des pores. La membrane sert donc uniquement de support à l'interface liquide-gaz. La vapeur

d'eau qui a traversé la membrane est condensée par divers procédés possibles puis recueillie à l'état liquide.

I.4.4.2.) . Avantages et inconvénients

Ce procédé comporte de nombreux avantages comparé aux autres procédés de séparation:

- on peut travailler à des températures inférieures à la température d'ébullition de l'eau à dessaler
- le colmatage engendré est plus faible
- le procédé a une grande sélectivité (taux de rejet en sel théorique de 100%)
- la technologie ne nécessite pas beaucoup d'espace
- le procédé est moins sensible à la concentration en alimentation contrairement, par exemple, à l'osmose inverse. Ainsi, il est possible de traiter une eau contenant jusqu'à 300 g/L de sels avec une variante de la distillation membranaire : la distillation membranaire sous vide
- il est possible de coupler ce procédé avec une énergie renouvelable

Cependant, il présente des inconvénients qui font que pour le moment cette technologie reste à l'échelle pilote:

- aucune membrane ni module n'ont été conçus spécifiquement pour ce procédé hybride
- la productivité est faible comparé à l'osmose inverse
- le procédé consomme beaucoup d'énergie

I.4.5.) Procédés de distillation :

I.4.5.1.) Présentation :

Le procédé de distillation est utilisé depuis très longtemps pour dessaler de l'eau de mer selon un principe simple: l'eau salée est chauffée jusqu'à sa température d'ébullition. Il y a d'un côté production de vapeur d'eau (l'eau douce) qu'il faut ensuite condenser et d'un autre côté une eau fortement concentrée en sels (la saumure).

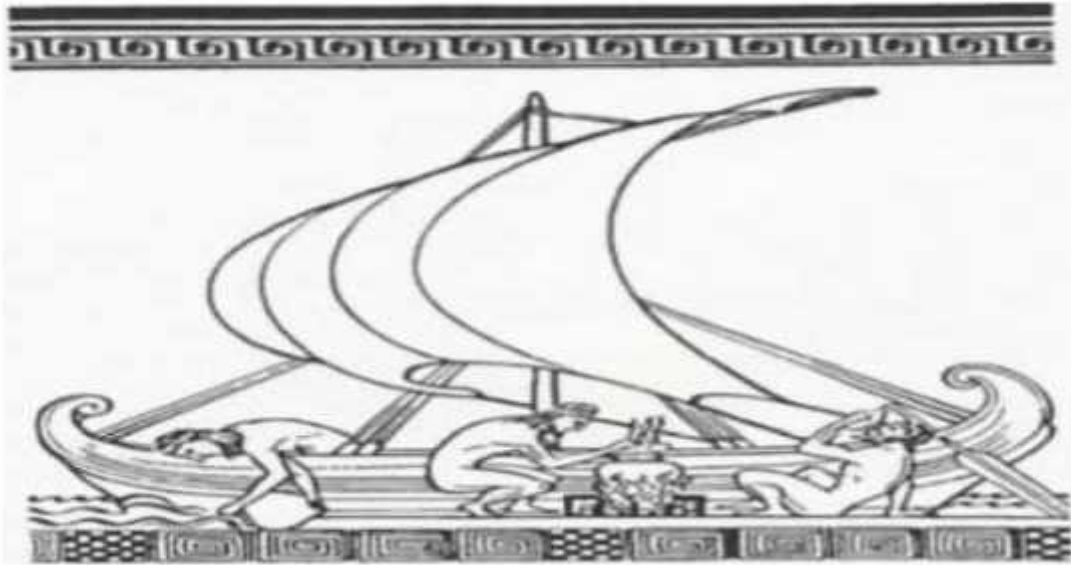


Figure 09

Dessalement par distillation suivant le procédé de Saint-Basile au milieu du IV^e siècle après J.-C. [3]

peut diviser ce procédé en plusieurs catégories suivant la nature de l'énergie employée:

- la distillation avec apport artificiel d'énergie thermique: la distillation thermique
- celle avec compression de vapeur
- la distillation avec apport naturel d'énergie rayonnante: la distillation solaire

Les deux premières catégories sont des procédés conventionnels tandis que la distillation solaire est un procédé non conventionnel qui est présenté dans une autre partie.

I.4.5.2.) . Distillation thermique

Cette catégorie de distillation permet de dessaler de grandes quantités d'eau. Elle comprend la distillation à multiples effets et la distillation multflash.

• **distillation à multiples effets**

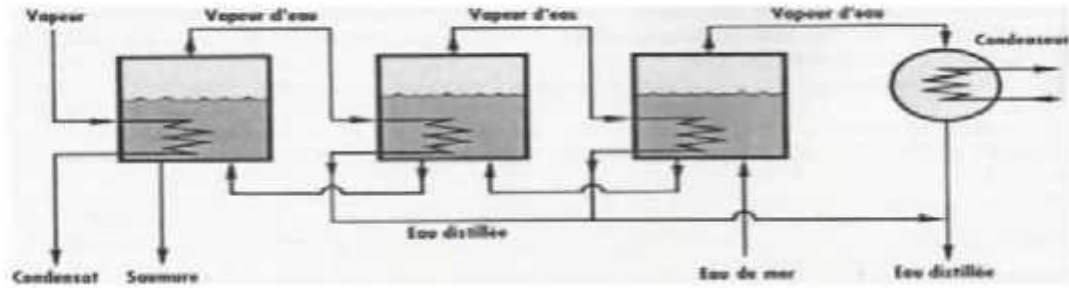


Figure 10 Distillation à multiples effets [3]

La distillation à multiples effets est la mise en série de plusieurs évaporateurs simple effet. Afin d'améliorer la consommation d'énergie thermique nécessaire pour l'évaporation de l'eau, la chaleur de condensation de la vapeur produite dans le premier évaporateur est utilisée dans le deuxième évaporateur qui fonctionne à température et pression plus faibles et ainsi de suite.

Deux types d'évaporateurs à multiples effets sont industrialisés: les évaporateurs à longs tubes verticaux et les évaporateurs à tubes horizontaux arrosés. Actuellement, ce dernier procédé revient en force sur le marché car son coût d'investissement est de 10 à 20% plus faible que pour la distillation multistage présentée dans le prochain point. De plus, sa consommation énergétique est également plus faible.

Ce procédé atteint généralement des capacités de l'ordre de l'ordre de 10 000 m³/jour avec un coût correspondant de 0,64 euros/m³. La capacité maximale en service est localisée en Arabie Saoudite à Al Hidd II avec 272 520 m³/j [8].

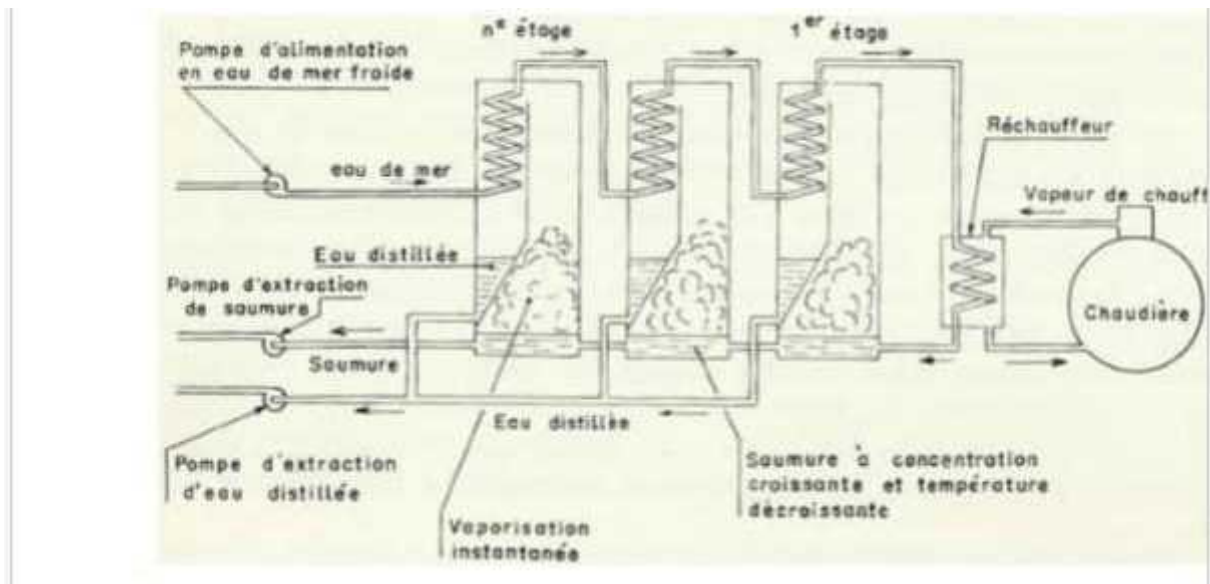


Figure 11 Distillation Flash [7]

procédé permet de diminuer les effets d'entartrage causés par la distillation à multiples effets par exemple. Voici le principe: l'eau s'échauffe dans les différents condenseurs de chaque étage (du ne au 1er) avant d'être introduite dans un réchauffeur qui permet d'augmenter encore la température. L'eau chaude est conduite vers le bas du premier évaporateur où la pression est inférieure à la pression de saturation:

⇒ vaporisation instantanée par détente appelée Flash

La vapeur produite se condense au contact du condenseur de l'étage concerné et le condensat (eau douce) est recueilli au sein de chaque étage. La température décroît depuis l'étage 1 jusqu'à n et par conséquent la pression, ceci permettant l'écoulement de l'eau entre les divers étages sans la nécessité d'utiliser des pompes.

Ce procédé a une capacité typique de 25 000 m³/jour à 0,88 euros/m³, la capacité maximale en service de 880 000 m³/jour étant observée en Arabie Saoudite à Shoaiba 3 [8]

I.4.5.3.) . Distillation par compression de vapeur

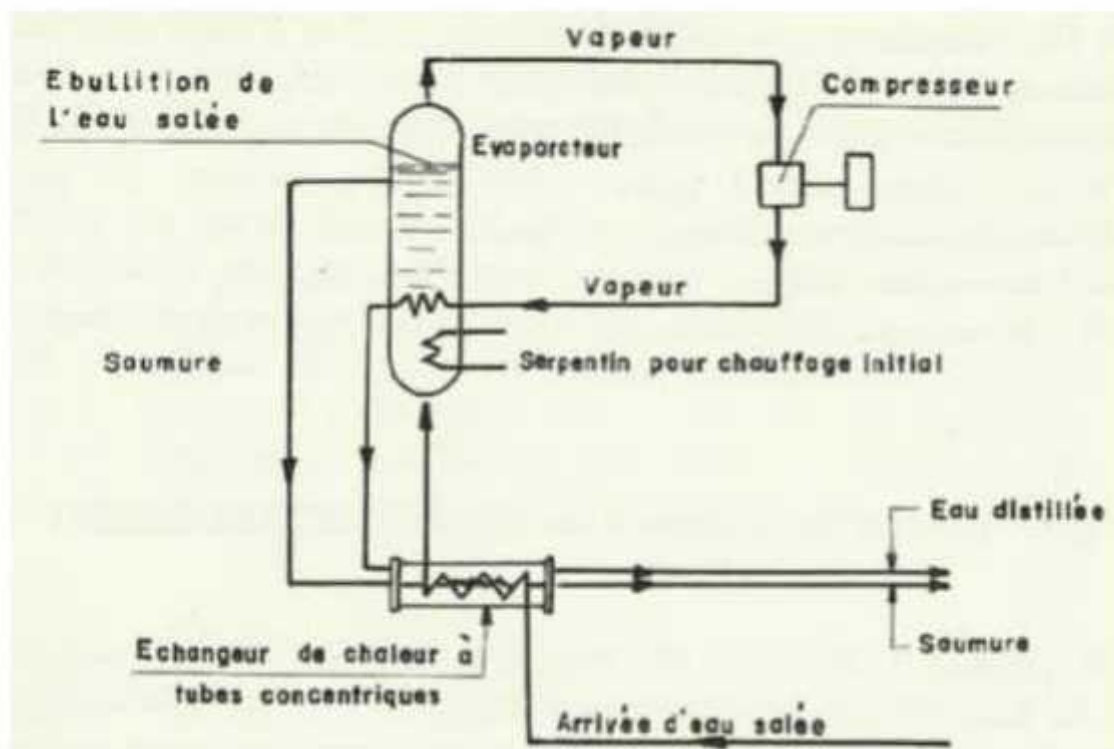


Figure 12 Distillation avec compression de vapeur [7]

L'eau à traiter est vaporisée dans une enceinte isolée thermiquement et la vapeur produite est aspirée par un compresseur qui permet d'augmenter sa température jusqu'à la température de saturation. De là, la vapeur passe dans un faisceau tubulaire placé en bas de l'enceinte et se condense, provoquant l'évaporation de l'eau grâce à la chaleur de condensation.

Un échangeur de chaleur à tubes concentriques permet de préchauffer l'eau salée à traiter et de refroidir la saumure et l'eau douce.

Ce procédé permet de traiter typiquement 3 000 m³/jour à 0,56 euros/m³, la capacité maximale en service étant de 80 000 m³/jour en Libye à Azzawiya [8].

⇒ Pour un débit à traiter de 19 200 m³/jour (24*800 m³/h), la distillation multiples effets ou multiflash paraît envisageable dans notre cas mais on obtiendra d'un côté de l'eau douce et de l'autre une saumure encore plus chargée. La distillation par compression de vapeur est en revanche utilisée pour des débits plus faibles.

Distillation solaire à effet de serre

Ce type de distillateur a fait l'objet de nombreuses études en vue d'optimiser son rendement et de baisser le coût du mètre cube d'eau distillée. La production journalière de ces distillateurs peut varier entre 1 et 8 litres par jour et par mètre carré de capteur (l/m²/j) dépendant de la saison, de la latitude et du degré d'optimisation du capteur

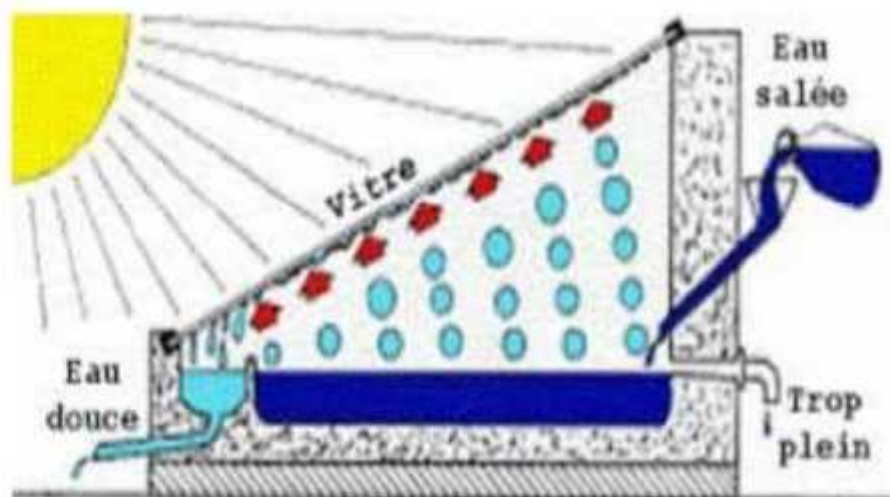


Figure.13 Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire plan à effet de serre

Chapitre II :

Étude théorique du distillateur solaire.

Ce chapitre est consacré à l'étude théorique d'un distillateur solaire, nous présenterons les principaux paramètres de fonctionnement, nous établirons le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur solaire.

II.1.)Le distillateur solaire :

Définition :

La **distillation solaire** est un procédé de production d'eau douce à fort économique, surtout dans les régions caractérisées par un bon ensoleillement [1]. ... Plusieurs types de distillateurs **solaires** ont été réalisés, les plus répandus sont ceux du type à effet de serre.

II.1.1.)Les différents types de la distillation solaire :

-Le puits solaire :

Dans le puits solaire, l'eau présente dans le sol s'évapore, chauffée par les rayons du Soleil traversant un film en plastique. La vapeur d'eau (ainsi que les éventuels solvants volatils inclus dans le sol) se condense sur la face interne du film, plus froide, et s'écoule vers son point bas central tendu par un poids. Elle est ensuite collectée dans un récipient placé en dessous. L'eau distillée est récupérable par un petit tuyau qui permet de l'extraire à l'extérieur du puits. Le puits solaire est utilisé comme système de survie.

Principe de fonctionnement d'une pompe solaire :

Description :

Une pompe solaire peut être composée avec plusieurs technologies différentes, volumétrique (Shurflo), centrifuge ou hélicoïdale (Lorentz) et pour des utilisations variées comme le pompage de surface (étang, lac, rivière, cuve) et le pompage immergé (puits, forage).

L'avantage de cette alimentation en courant continu est que l'on va pouvoir adapter la vitesse de rotation en fonction de l'énergie disponible, ce qui va permettre de pomper même avec un ensoleillement ou une tension batterie faible. De plus, de part la technologie ou via un contrôleur, on se débarrasse des pointes de courant au démarrage.

Figure 1 de principe pompage de surface.

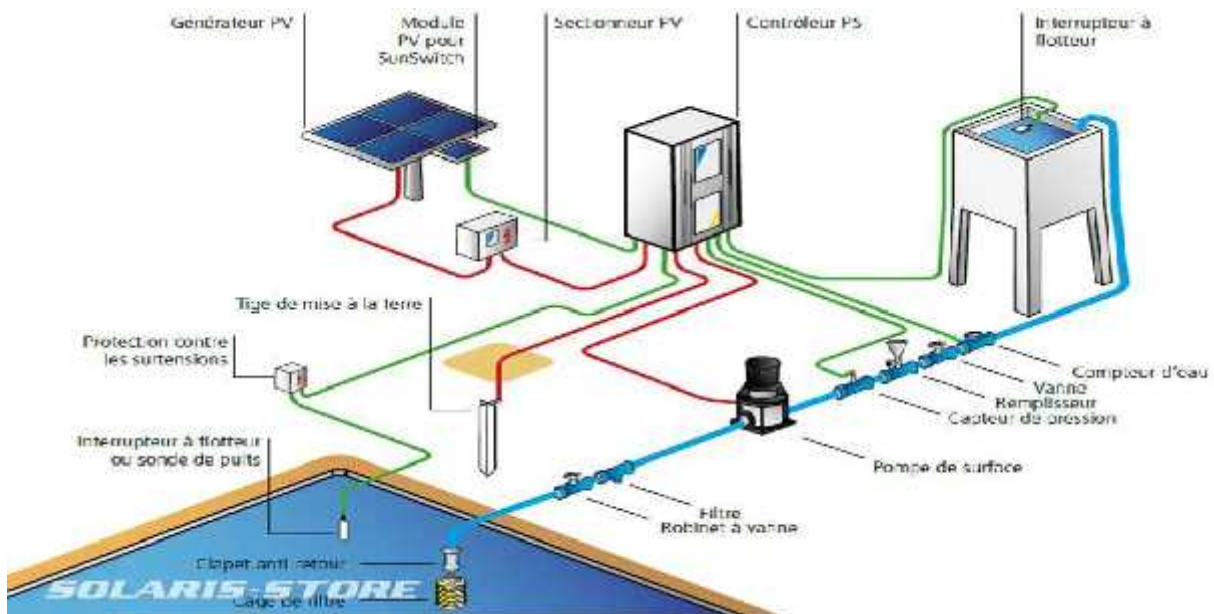


Figure 1 de principe pompage de surface.

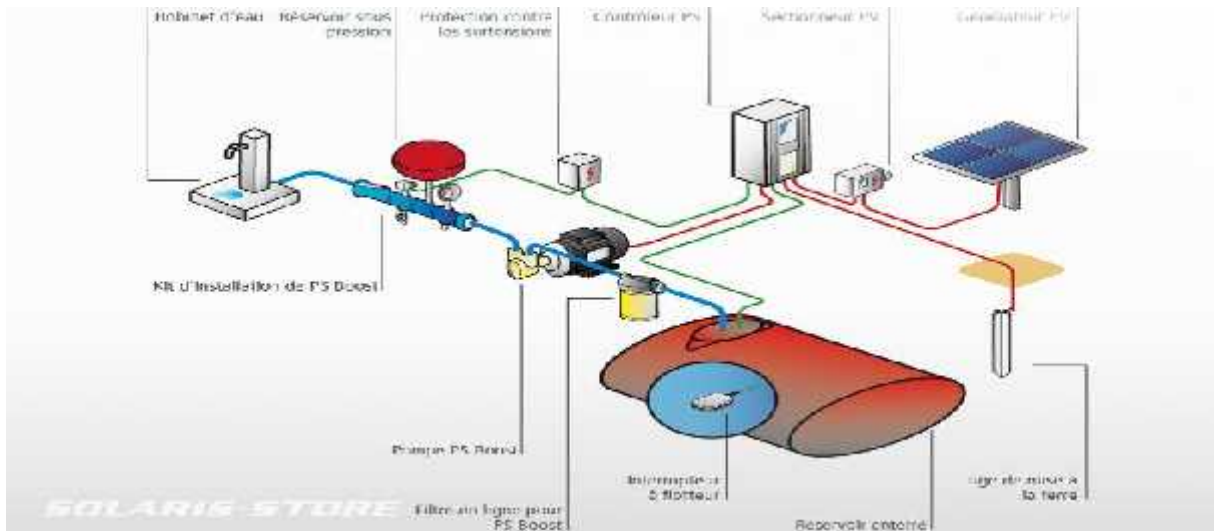


Figure 2 : de principe pompage de surface avec surpresseur

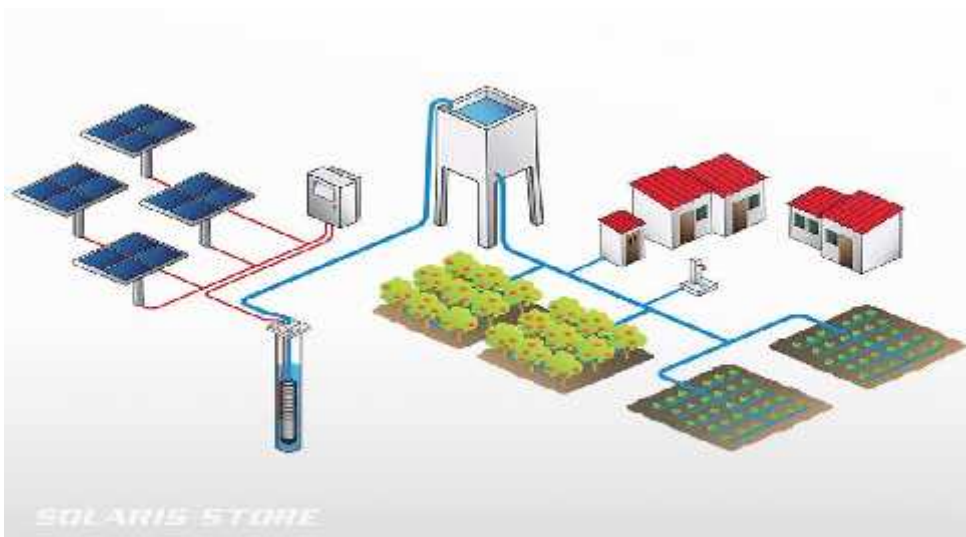


Figure 3 de principe pompage immergé

Fonctionnement :

Généralement, lorsqu'on veut faire fonctionner un récepteur à tout moment, jour ou nuit, ensoleillement ou non, avec un système photovoltaïque, on utilise une batterie d'accumulateurs. Pour le pompage, c'est différent. En effet, il est plus facile et moins onéreux de stocker de l'eau que de l'énergie. De plus, on s'affranchit de la durée de vie de la batterie et de l'entretien.

Dans ce cas, on pratique le pompage "au fil du soleil". La pompe est couplée directement au champ solaire photovoltaïque via un contrôleur qui va permettre, entre autres, d'optimiser le rendement journalier de la pompe. Le débit varie en fonction de la vitesse de rotation et donc de l'ensoleillement.

Dans certains cas, le fonctionnement sur batterie sera inévitable, on essaiera de rester sur des pompes avec une tension d'alimentation semblable à celle d'une batterie 12V, 24V ou 48V voir 36V et 96V.

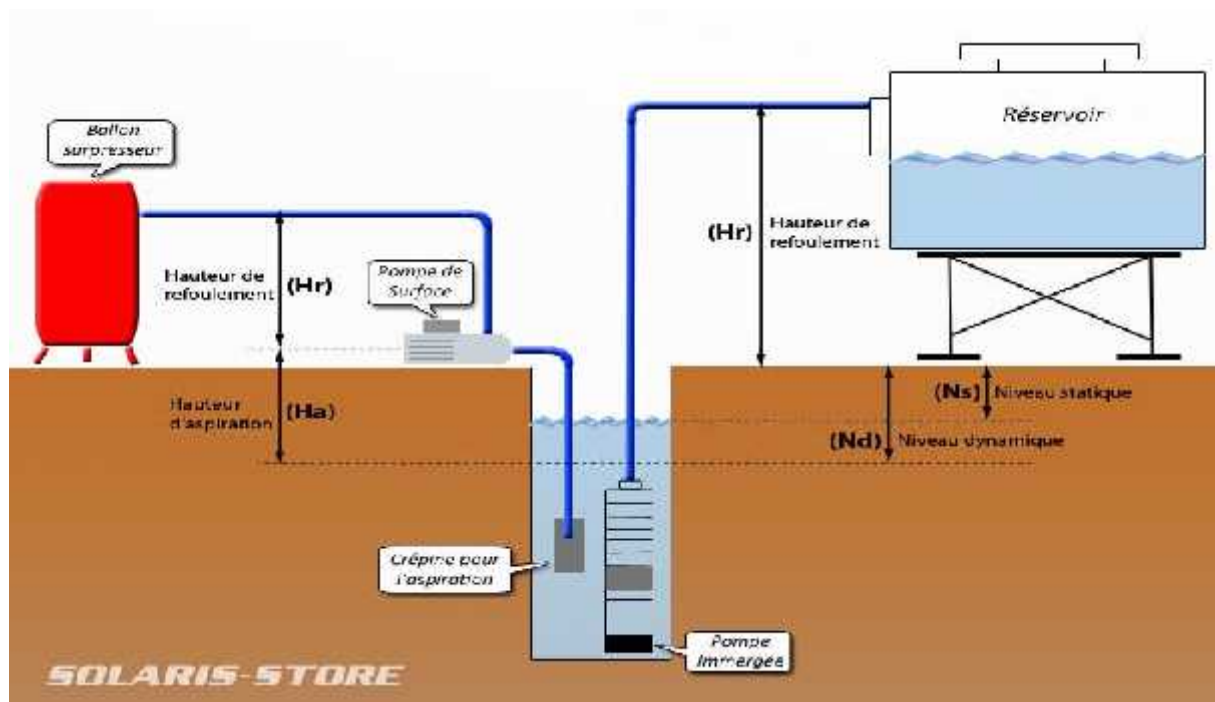


Figure 4 :Système de pompage type.

Pour le pompage en général, on utilise un vocabulaire bien spécifique, et les termes les plus couramment employés sont :

1/ Niveau statique (Ns) :

C'est la différence de dénivelé ou d'altitude en mètres (m) entre le niveau d'eau et le sol lorsque la pompe est arrêtée, il n'y a donc pas de variations de niveau.

2/ Niveau dynamique (Nd) :

C'est la différence de dénivelé ou d'altitude en mètres (m) entre le niveau d'eau et le sol lorsque la pompe est en marche. Le niveau peut être amené à varier et même fortement dans des forages par exemple ou en fonction des saisons (évaporation). Cette information est obtenue auprès du foreur.

3/ Hauteur de refoulement (Hr) :

C'est la différence de dénivelé ou d'altitude en mètres (m) entre le sol et l'arrivée au point le plus haut de la cuve, du réservoir, du robinet, surpresseur, etc...

4/ Hauteur d'aspiration (Ha) :

Uniquement pour les pompes de surface, c'est la différence de dénivelé ou d'altitude en mètres (m) entre le niveau d'eau dynamique et la pompe.

5/ Perte de charge (P) :

C'est la perte de pression et de débit provoquée par les frottements de l'eau sur les parois des tuyaux. Plus le tuyau est long et le débit important, plus les pertes de charge augmentent. Elles sont exprimées en pourcentage (%) ou en (bars).

Pression utile (Pu)

C'est le besoin en pression (bars) à l'arrivée. Pour un réseau domestique, dans une habitation par exemple, la pression utile est en général de 3 bars, il est donc important d'en tenir compte dans le dimensionnement de la pompe.

6/ Hauteur Manométrique Totale (HMT) :

C'est le total des contraintes hydrauliques liées à la hauteur ; Hauteur d'aspiration (Ha), Hauteur de refoulement (Hr), Niveau dynamique (Nd), la longueur de tuyau (L), les pertes de charges (P) et la pression utile à l'arrivée (Pu). Exprimé en mètres (m).

Soit pour une pompe de surface : $H_a + H_r + L + P_u + P$

Et pour une pompe immergée : $N_d + H_r + L + P_u + P$.

- La boîte solaire :

Dans la boîte solaire, l'eau est ajoutée manuellement ou de manière automatique par un système à flotteur. L'énergie solaire traversant la vitre supérieure de la boîte, chauffe l'eau jusqu'à son point d'évaporation. La vapeur d'eau produite se condense sur la vitre relativement plus froide. Celle-ci, en pente légère, conduit l'eau distillée vers un récipient de stockage.

Mécanisme de transfert de chaleur vers l'alimentation a cuire :

Quand un ustensile de cuisine est déposé sur la plaque absorbante d'un simple cuiseur solaire boîte, orienté vers le soleil. Le transfert de chaleur vers l'alimentation, qui se trouve à l'intérieur de l'ustensile, se fait dans les conditions suivantes, (Fig. 5)

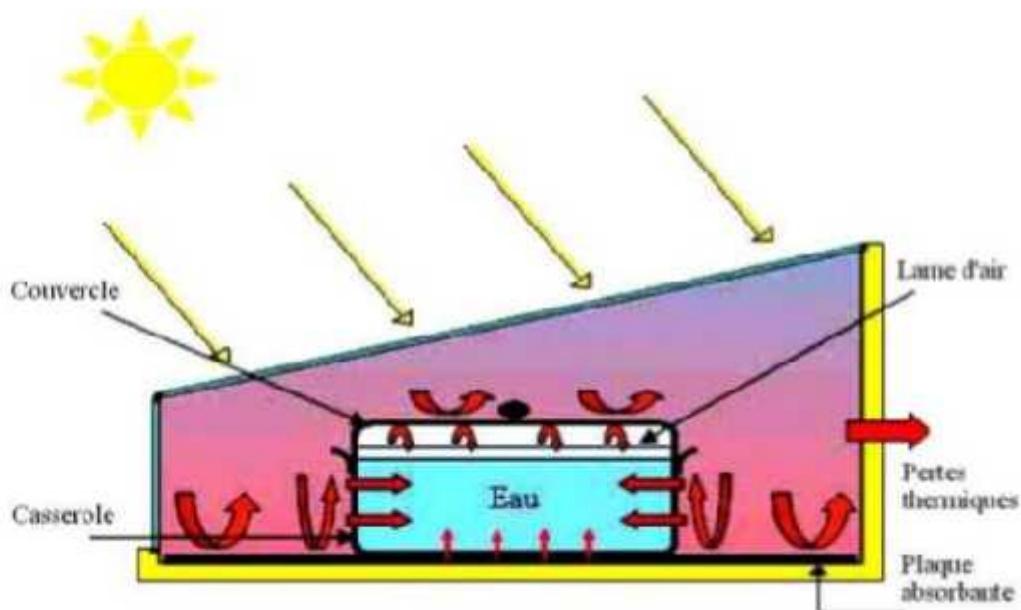


Figure 5: Schéma représentant le mécanisme de transfert de chaleur vers l'alimentation se trouvant à l'intérieur de l'ustensile de cuisine dans un simple cuiseur solaire boîte.

- La plaque absorbante est irradiée sur sa face supérieure. Par convection naturelle, elle transmet une grande partie du rayonnement absorbé qu'elle convertit en chaleur vers l'air

intérieur. Par conduction, elle transmet une fraction de sa chaleur vers la base de l'ustensile de cuisine qui est en contact direct avec la plaque absorbante. Cette fraction de chaleur est absorbée par l'alimentation se trouvant à l'intérieur de l'ustensile.

- Le couvercle de l'ustensile de cuisine absorbe un maximum de rayonnement solaire, mais cette surface demeure non effective dans le processus du transfert de chaleur vers l'alimentation à cuire. Car cette dernière n'est pas en contact direct avec le couvercle. Il reste toujours une lame d'air entre la surface supérieure de l'alimentation et le couvercle. Cette lame d'air se comporte comme un isolant thermique et on se retrouve dans le cas d'une cavité chauffée par le haut. La plus grande partie de la chaleur du couvercle est alors transmise, par convection naturelle, à l'air intérieur du cuiseur.

- La surface latérale de l'ustensile de cuisine est partiellement irradiée et est en contact direct avec l'air chaud intérieur du cuiseur. Elle est donc effective dans le processus du transfert de chaleur vers l'intérieur de l'ustensile pour chauffer l'alimentation à cuire.

Il devient alors très important d'élever la température de l'air intérieur du cuiseur en améliorant l'échange convectif avec la plaque absorbante. Ceci peut être obtenu moyennant la plaque absorbante à ailettes. Il s'agit d'une plaque métallique plane dotée d'ailettes comme montrée sur la figure 6.

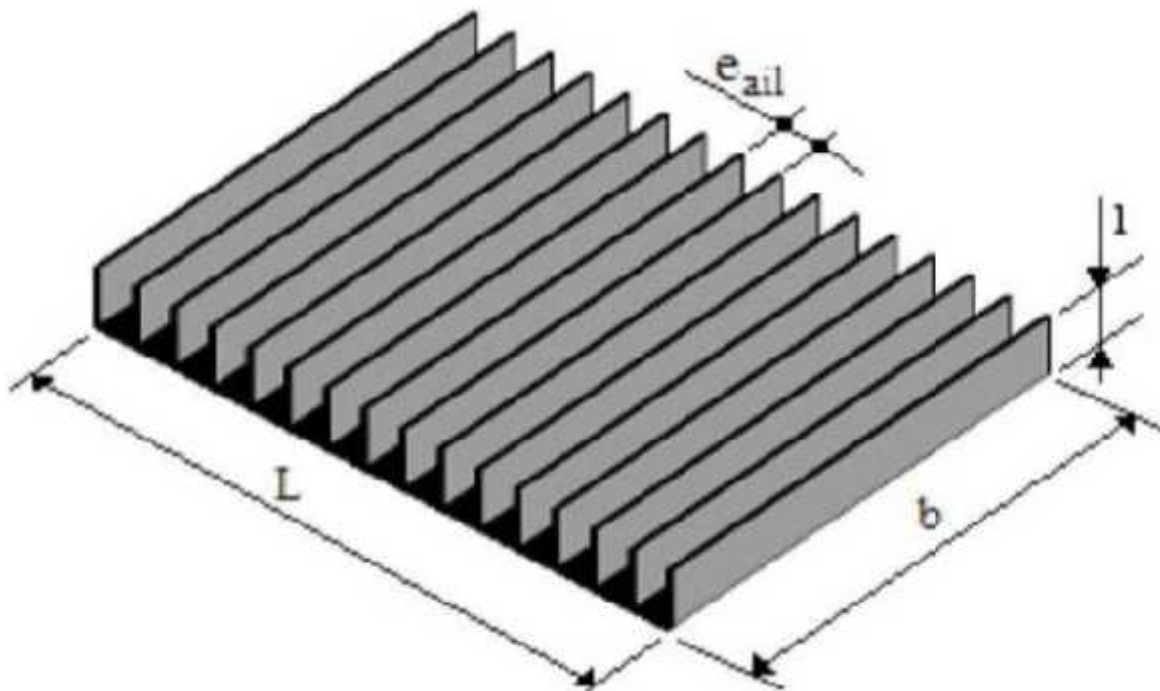


Fig. 6: Schéma montrant la forme de la plaque absorbante à ailettes.

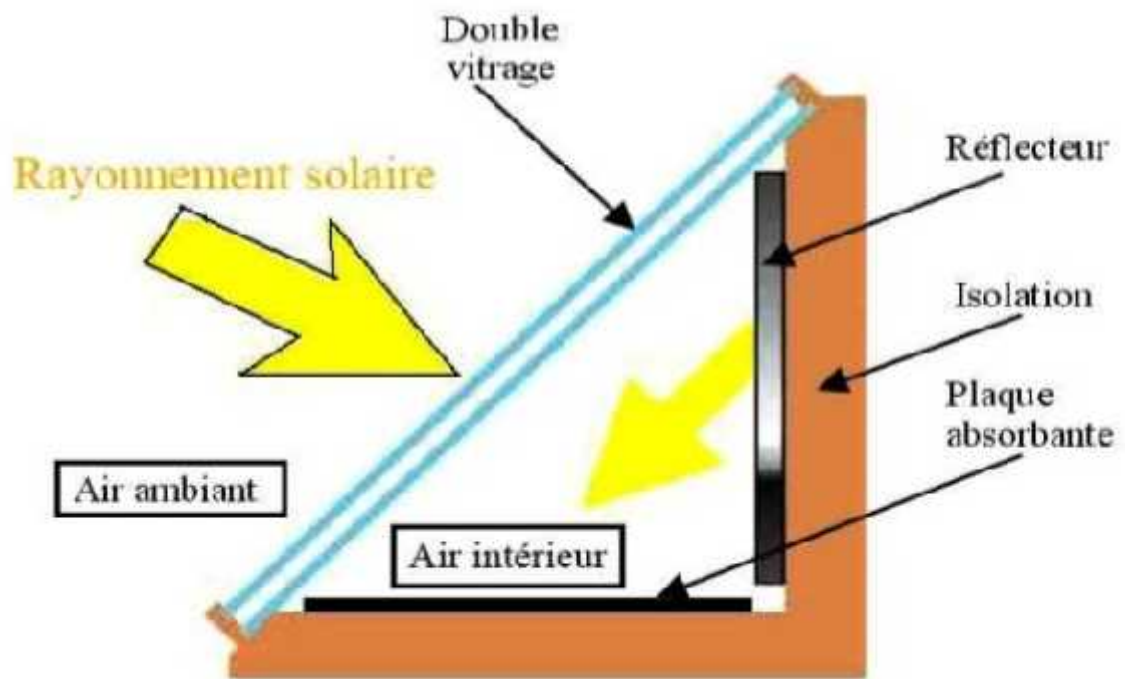


Figure 7 : Schéma représentant les éléments constitutifs le modèle du cuiseur solaire étudié.

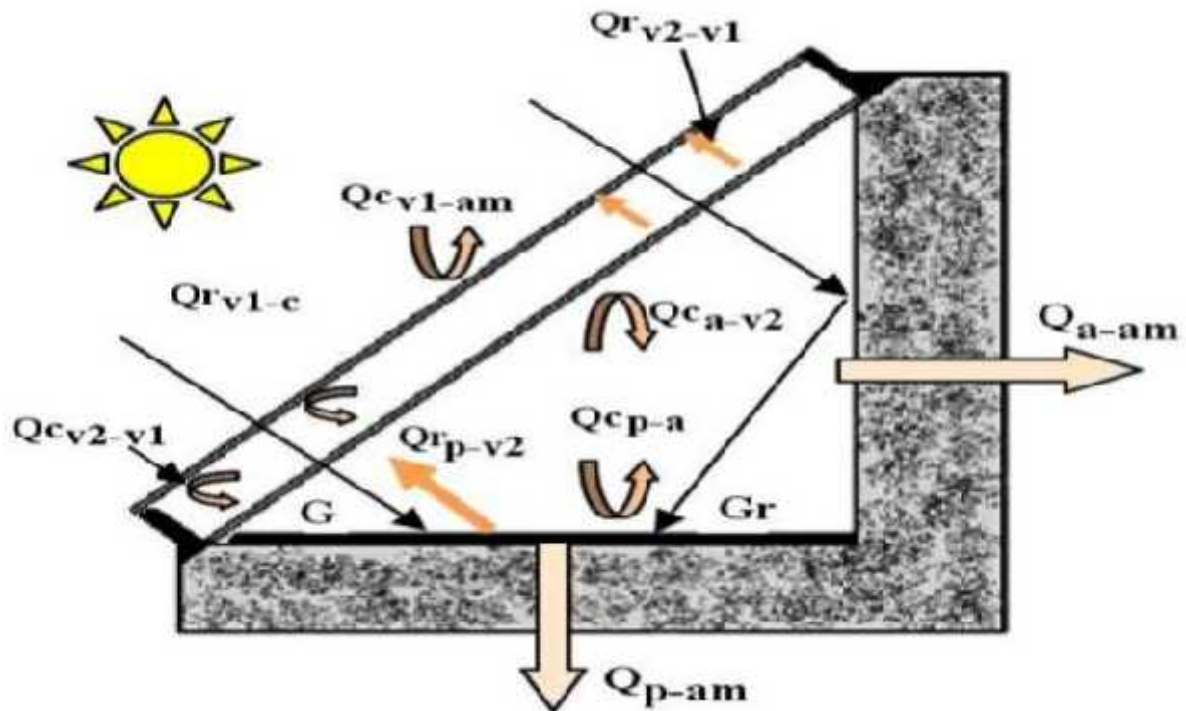


Figure 8 : Schéma représentant les différents échanges thermiques mis en jeu.

- La pyramide solaire :

La pyramide solaire est une variante de la boîte solaire permettant une production élevée d'eau potable grâce à une grande surface de condensation. Elle peut couvrir les besoins de base en eau potable d'une centaine d'habitants en zones tropicales et sub-tropicales. Dans les pays de mousson, la pyramide solaire peut être combinée avec un système de récupération des eaux de pluie. Une pyramide solaire d'une surface de plusieurs centaines de mètres carrés située dans des conditions tropicales favorables peut produire jusqu'à 1 000 litres d'eau potable par jour. L'alimentation en eau à traiter se fait, selon les cas, soit avec de l'eau de mer soit avec de l'eau provenant d'un lac ou d'une rivière. L'installation est complétée par un système de reminéralisations de l'eau distillée. L'énergie nécessaire à gonfler une pyramide en film plastique peut être obtenue par des panneaux photovoltaïques avec un système de batteries de secours. Un générateur électrique peut être nécessaire pour les opérations de pompage, nettoyage ou de maintenance. Des cônes solaires gonflables sont des variantes déjà installées en zones tropicales et subtropicales.

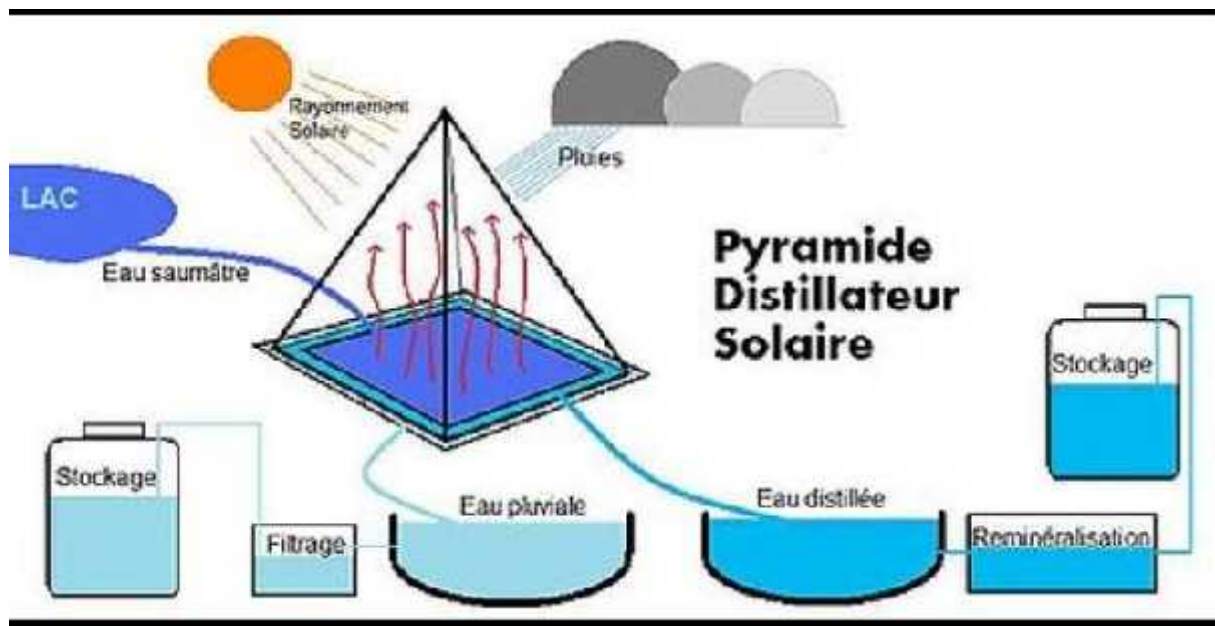


Figure 9 : la pyramide distillateur solaire.

II.2. Les paramètres influant du système de la distillation

On peut classer les paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur :

II.1.1. Les paramètres externes.

II.1.2. Les paramètres internes.

II.2.1 Paramètres Externes :

Les études faites par plusieurs chercheurs ont montré que les paramètres les plus fréquemment retenus sont:

II.2.1.1 Paramètres météorologiques :

- Intensité du Rayonnement Solaire :

- La température ambiante de l'air et la vitesse du vent :

Aux températures de saumure élevées, augmenter la différence de température entre la saumure et la vitre en augmentant la vitesse de vent, en baissant la température ambiante. Par contre, aux températures faibles de la saumure, et en augmentant la vitesse du vent revient à faire chuter le taux d'évaporation.

- L'intermittence des nuages :

La quantité d'énergie solaire reçue par une surface dépend des paramètres A, et B qui dépendent de la nature de ciel. Cela revient à dire que le passage des nuages diminue l'absorptance effective moyenne.

II.2.1.2) Paramètres Géographiques :

-Les paramètres géographiques tels que la longitude

-La latitude.

- La hauteur.

II.2.2.Paramètres internes :

II.2.2.1Paramètres de position :

a) l'emplacement du distillateur :

Les distillateurs doivent être placés de façon à éviter les obstacles « l'effet de masque » qui empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface de captation.

b) l'orientation :

Elle dépend essentiellement du fonctionnement du distillateur pendant la journée

L'inclinaison

L'angle d'inclinaison de l'absorbeur par rapport à l'horizontale, doit faire l'objet d'un choix judicieux. Ceci consiste à déterminer la quantité d'énergie solaire introduite dans le distillateur et à minimiser la distance entre la saumure et la vitre.

L'inclinaison influe aussi sur les équations des bilans énergétiques des différents constituants du distillateur.

II.2.2.2. Paramètres de construction :

-La Couverture :

La couverture verrière intervient essentiellement par sa nature qui peut être en verre ou en plastique transparent. Elle a deux rôles à jouer : d'une part c'est un filtre sélectif de rayonnement solaire (le rayonnement émis ou réémis par l'intérieur du bassin à température basse qui ne la traverse pas) et d'autre part, c'est une surface de condensation de la vapeur d'eau. Cette dernière est une bonne mouillabilité et est nécessaire pour éviter la condensation en gouttelettes qui ont tendance à retomber dans le bassin et qui réfléchissent une partie importante du rayonnement incident pour assurer le ruissellement de l'eau condensée vers la gouttière (collecteur).

- La surface absorbante :

La surface absorbante peut être construite de plusieurs matériaux (bois, Tôle Plane Galvanisable, colle et de peinture noir mate). Le choix de la matière de la surface absorbante ou du bac noir dépend de son inertie thermique, de la résistance à l'oxydation par l'eau et des dépôts minéraux.

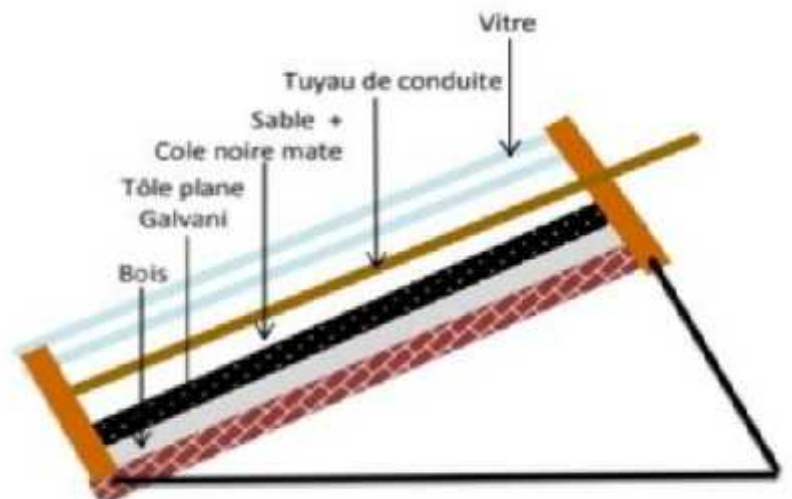


Figure 10: photo du capteur.

Figure 11 : Schéma de l'absorbeur.

- La distance entre la surface d'évaporation et la surface de condensation :

La réduction de ce paramètre augmente le facteur de performance brut. Il est beaucoup plus déterminant que l'inclinaison de la vitre du couvercle.

- L'épaisseur de la nappe d'eau à distiller :

Plus l'épaisseur de la nappe d'eau est importante, moins sa température fluctue au cours de la production. La différence entre les distillateurs, à petite et grande épaisseur de saumure, est notable pour les distillateurs dont la base est isolée thermiquement. La production est d'autant plus importante que l'épaisseur est faible; d'autre part, plus l'épaisseur de la saumure est grande, plus longtemps dure la distillation après le coucher du soleil.

- L'isolation des faces latérales du distillateur :

L'isolation des faces latérales a pour but d'éliminer les pertes (transfert de chaleur avec le milieu extérieur).

II.2.2.3.) Les Paramètres optiques :

Ce sont les paramètres optiques (l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et la transmittivité) de la surface de la couverture et de la surface absorbante.

II.1.2.4.) Paramètres thermo physiques :

Les paramètres thermo physiques sont représentés par :

1) La couverture et la surface absorbante :

- a) La conductivité thermique.
- b) La chaleur spécifique.
- c) La diffusivité thermique.

2) La saumure:

- a) La conductivité thermique.
- b) La chaleur spécifique.
- c) La viscosité dynamique.
- d) La viscosité cinématique.
- e) La chaleur latente de vaporisation.
- f) Le coefficient de dilatation thermique.
- g) La diffusivité thermique.

3) Le mélange air-vapeur:

- a) La conductivité thermique.
- b) La chaleur spécifique.
- c) La viscosité dynamique.
- d) La viscosité cinématique.
- e) Le coefficient de dilatation thermique.

II.2.2.5.) Paramètre de fonctionnement :

Ces paramètres sont les différentes températures du système et du fluide, en particulier la température de l'eau à distiller.

II.3.) Caractéristiques de fonctionnement :

On distingue notamment :

II.3.1.) Le rendement.

II.3.2.) Les efficacités interne et globale.

II.3.3. La performance.

II.3.1.) Le rendement :

C'est la quantité d'eau produite par unité de surface de plan et par jour.

L'inconvénient majeur de ce critère et qu'il ne fait pas mention de l'énergie solaire qu'il arrive sur le distillateur.

Les rendements d'un distillateur est :

$$\eta = \frac{m_d \cdot h_e}{G} \quad (\text{II.1})$$

h_e : Enthalpie d'évaporation

m_d : La masse du distillat

G: Puissance de rayonnement solaire incident par unité de surface

II.3.2.) Les efficacités :

L'efficacité interne.

L'efficacité globale.

L'efficacité globale est définie le rapport :

$$\eta_g = \frac{Q_e}{G \cdot A} = \frac{m_d \cdot L_v}{G \cdot A} \quad (\text{II.2})$$

Q_e : Flux thermique par évaporation entre le d'eau et le vitrage

S : surface

L_v : chaleur latente

L'efficacité interne :

Si l'efficacité globale rapporte la quantité d'eau produite à l'énergie solaire tombant sur une surface horizontale, elle ne fait pas mention de la quantité d'énergie entrant réellement dans le distillateur, d'autant plus qu'un distillateur est construit en général pour un lieu donné et avec une pente couverture fixe. Un changement de pente et de la localité fait varier la quantité d'énergie qui entre dans le distillateur.

On définit donc une efficacité dite interne qui tiens compte de ces paramètres et qui est définie par :

$$\eta_i = \frac{Q_e}{Q_e} \quad (\text{II.3})$$

Pour intensité globale G, l'expression de Q_{eau} est :

$$Q_e = (\tau_v \alpha_e + \tau_v \cdot \tau_e \cdot \alpha_D) \cdot G \cdot A \quad (\text{II.4})$$

$$Q_e = \alpha_e \cdot G \cdot A \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$$\alpha_t = \tau_v \cdot \alpha_e + \tau_v \cdot \tau_e \cdot \alpha_b \text{ (II.6)}$$

$$Q_e : F \quad \text{heri} \quad \zeta u \eta \quad d'e$$

$$\alpha_t : A \quad \acute{e} e \quad l'e$$

$$\tau_v : T \eta \quad \acute{e} d$$

$$\tau_e : T \quad \acute{e} d \ l'e$$

$$\alpha_e : A \quad \acute{e} d \ l'e$$

$$\alpha_b : A \quad \acute{e} d$$

II.3.3.) La performance :

$$F = \frac{Q \quad \acute{e} d' \acute{e} n \quad e \quad \acute{e} e a b \quad d \ 2}{Q \quad \acute{e} d' e \quad p \quad a b \quad d \ 2}$$

$$F \ H = \frac{Q \quad \acute{e} d' \acute{e} n \quad e \quad \acute{e} e a b \quad d' u \quad h}{Q \quad \acute{e} d' e \quad p \quad a b \quad d' u \quad h}$$

A un instant de La journée, le facteur de performance (F.P) est donné par la relation suivante :

$$F = \frac{m}{\alpha_t \cdot G \cdot A} \text{ (II.8)}$$

II.4.) Bilan énergétique dans un distillateur simple :

II.4.1.) Echange de chaleur à l'intérieur du distillateur :

Échanges de chaleur de l'eau entre l'absorbeur et la surface de condensation :

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

L'eau cède un flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle aux surfaces de condensation.

Puisque il existe une évaporation, l'eau perd certain, un flux de chaleur.

Échange de chaleur entre la vitre et la surface d'eau :

Les flux solaires incidents cédés par la nappe d'eau ne sont pas reçus intégralement par la surface de condensation.

À cet égard et au cours du transfert, une partie est absorbée par l'atmosphère interne et les parois latérales.

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

II.4.2)Échange de chaleur à l'extérieur du distillateur :

Échange de chaleur entre la vitre et le milieu ambiant :

Le milieu extérieur cède le flux de chaleur par rayonnement solaire à la vitre, dont une partie est réfléchi.

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

II.4.3.)Modélisation mathématiques :

La théorie d'un distillateur solaire simple en forme de serre (figure)

Illustre les différents échanges de chaleur qui se produisent dans un distillateur solaire.

Elle est fondée sur quatre bilans. En régime transitoire, les équations régissant le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur.

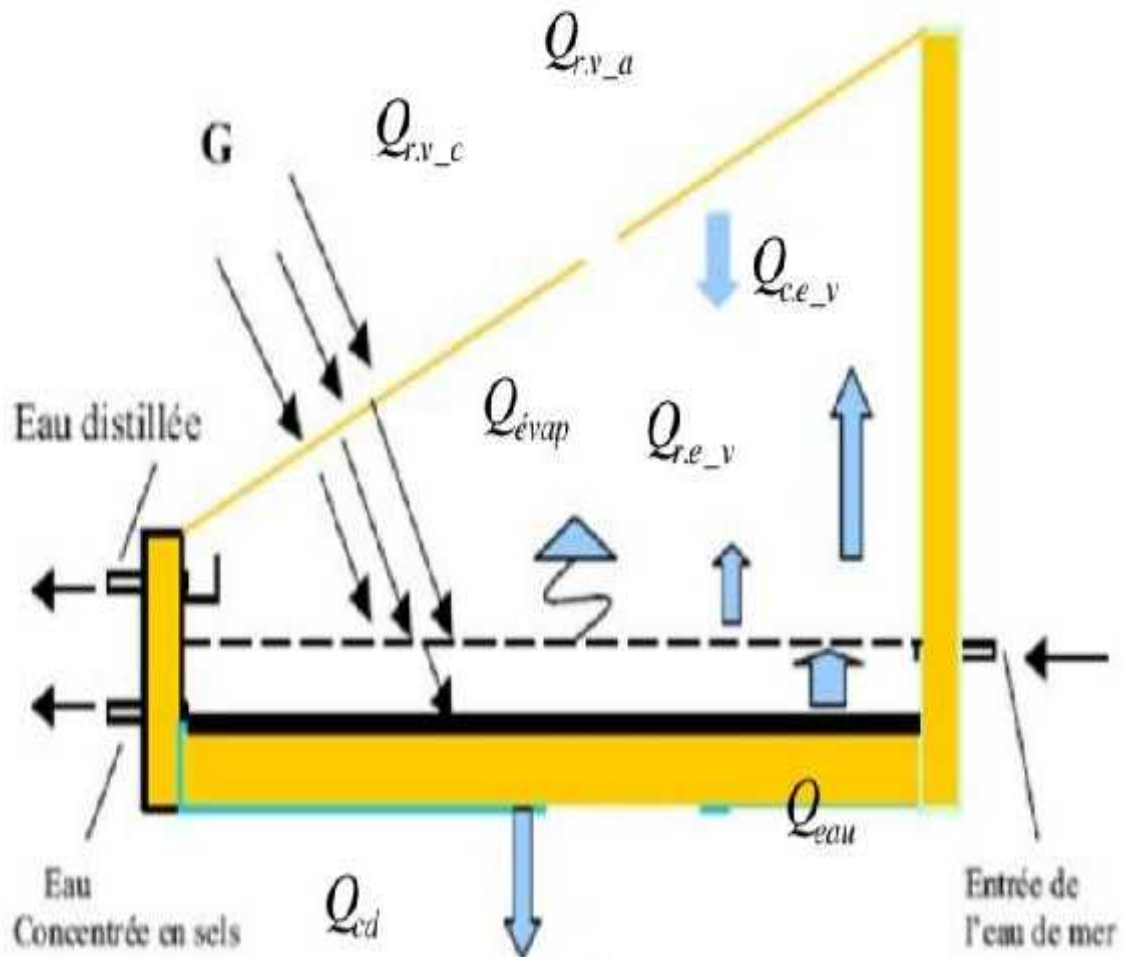


Figure 12 :Bilan énergétique d'un distillateur solaire.

- Avant d'écrire le bilan thermique, on doit tenir des hypothèses simplificatrices suivantes :
- La température de chaque composant est uniforme.
- Transfert de chaleur est unidimensionnel.
- Le soleil est assimilé à un corps noir.
- La couverture est propre.
- La condensation se fait uniquement sur la couverture (Il n'y a pas de condensation sur les parois latérales).

- La saumure est statistique sur le bassin.
- Le bassin est étanche.
- La condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue (Le verre possède une bonne mouillabilité)
- La condensation de la saumure n'intervient pas dans les transferts de chaleur et de masse à partir de et vers la saumure.
- Les propriétés physiques des matériaux sont considérées constantes.
- Les parois latérales sont supposées adiabatiques.
- La chaleur perdue par addition d'eau d'appoint et celle emportée par le distillat sont supposées négligeables.

Par analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques (Tableau)

On peut indiquer les lois d'OHM.

Nous approchons le fonctionnement réel du distillateur par l'utilisation de la méthode dite des nœuds.

Cette méthode nous permet de découper notre système de distillateur en plusieurs sous-systèmes.

Nous écrivons donc, pour chaque nœud du distillateur, l'équation du bilan de puissance lui correspondant, puis nous simulons le fonctionnement selon la méthode dite « pas à pas », ceci nécessite l'écriture des équations en régime transitoire.

Considérons une section quelconque du système à l'instant t, soit i l'un des milieux représentés dans cette section. (M_i) sa masse en [kg].

(C_{p_i}) sa chaleur spécifique en [J/kg.°C], et sa température en [°C].

Le bilan au nœud(i) donné par :

$$M_i \cdot C_{p_i} \cdot \frac{dT_i}{dt} = \sum_{t=1}^n Q_t + P_t \quad (\text{II.9})$$

P_i = puissance absorbée par le corps d'indice i.

Tableau (12): analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques.

grandeurs thermique	Grandeurs Électriques
Température	Potentiel électrique
Flux thermique	courant électrique
Résistance thermique	Résistance électrique
capacité thermique	Capacité électrique

1) Bilan du vitrage :

La quantité reçue par la vitre est évacuée par conductivité à travers celle-ci soit celle-ci soit :

A la face extérieure :

$$\frac{M_v C_p v}{2 \cdot A_v} \frac{dT_v}{dt} = \left(\frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) (T_v - T_v) - Q_{r.v.e_c} - Q_{c.v_a} + \frac{P_v}{2} \quad (\text{II.10})$$

A la face intérieure :

$$\frac{M_v \cdot C_p v}{2 \cdot A_v} \frac{dT_{v,i}}{dt} = - \frac{\lambda_v}{\delta_v} (T_v - T_v) + Q_{r.e_v,i} + Q_c + Q_e + \frac{P_v}{2} \quad (\text{II.11})$$

Q_r : Flux thermique perdu par la vitre par rayonnement vers l'extérieur.

Q_c : Flux thermique perdu par convection par la vitre vers l'extérieur.

T_v : Température de la vitre face intérieure

T_v : Température de la vitre face extérieure

λ_v : Conductivité thermique de la vitre

δ_v : Épaisseur de la vitre

2) Bilan de l'eau (Saumure) :

$$\frac{M_e C_p e}{A_e} \frac{dT_e}{dt} = Q_c - Q_{c.e_v} - Q_e - Q_{r.e_v,i} + P_e \quad (\text{II.12})$$

P_e : Puissance absorbée par la nappe d'eau, elle est négligeable pour l'eau de mer

Q_c : Flux thermique par convection entre le fond du bac et l'eau

3) Bilan du bassin inférieur :

$$\frac{M_L C_{pL} dT_D}{A_D} = P_D - Q_C - Q_C \quad (\text{II.13})$$

Q_C : Flux thermique perdu par conduction du bac

4) Bilan de l'isolant :

Pour réduire les pertes de chaleur à travers la base, nous utilisons isolant thermique.

Le côté intérieur du distillateur reçoit la chaleur perdue de l'absorbeur et le côté extérieur cède de la chaleur vers l'extérieur par rayonnement et par convection.

Au niveau de la face intérieure :

$$\frac{M_L C_{pL} dT_{L,i}}{2.A_L} = Q_C - \frac{\lambda_L}{\delta_L} (T_{L,i} - T_{L,e}) \quad (\text{II.14})$$

Q_C : Flux thermique par conduction entre le bac et l'isolant thermique

Au niveau de la face extérieure :

$$\frac{M_L C_{pL} dT_{L,e}}{2.A_L} = \frac{\lambda_L}{\delta_L} (T_{L,i} - T_{L,e}) - Q_r - Q_c \quad (\text{II.15})$$

5) Débit de condensât :

$$\frac{dM_c}{dt} = h_e \frac{(T_e - T_v)}{L_v} \quad (\text{II.16})$$

M_c : Masse du condensât.

L_v : Chaleur latente de vaporisation.

T_e : Température de la vitre.

h_{evap} : Coefficient de transfert de la chaleur par évaporation-condensation entre le film d'eau et le vitrage.

II.4.4.) Expression des différents coefficients de transfert de la chaleur :

Les expressions pour les divers termes des équations données ci-dessous sont :

Par rayonnement eau-vitre :

$$Q_{T,e_v} = h_{T,e_v} (T_e - T_{v,i}) \quad (\text{II.17})$$

$$h_r h_r = \epsilon_e \cdot \sigma \cdot (T_e^2 + T_{v,i}^2) \cdot (T_e + T_{v,i}) \quad (\text{II.18})$$

ϵ_e : E é e

σ : C d S - B

$$\epsilon_e = \left[\frac{1}{\epsilon_v} + \frac{1}{\epsilon_v} \right]^{-1} \quad (\text{II.19})$$

Par convection eau-vitre :

$$Q_{L.e_v} = h_{L.e_v}(T_e - T_{v,i}) \quad (\text{II.20})$$

hc.ev : Coefficient de transfert de Chaleur par convection entre le film d'eau et la vitre

$$h_{L.e_v} = 0,884 \left[T_e - T_{v,i} + \frac{(p_e - p_v)(T_{v,i} + 273,15)}{273,15 - p_e} \right]^{0,3} \quad (\text{II.21})$$

Pe : pression de vaporisation à Te.

Pv : pression de vaporisation à Tvi.

Par vaporisation :

$$Q_e = h_e (T_e - T_{v,i}) \quad (\text{II.22})$$

hevap : Coefficient de transfert de Chaleur par évaporation-condensation entre le film d'eau et le vitrage (19) :

$$h_e = 16.273.10^{-3} h_{L.e_v} \frac{(p_e - p_{v,i})}{(T_e - T_{v,i})} \quad (\text{II.23})$$

La pression de vapeur d'eau est estimée par la relation suivante (20) :

$$P = 133.32 \exp \left(18,6686 - \frac{4773,1}{T + 273,15} \right) \quad (\text{II.24})$$

Par rayonnement vitre-milieu ambiant :

$$Q_{T.v_c} = h_{T.v-c} (T_{v,e} - T_c) \quad (\text{II.25})$$

hr.vciel : Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement par la vitre vers l'extérieur.

$$h_{T.v_c} = \epsilon_v \cdot \sigma (T_{v,e}^2 - T_c^2) \cdot (T_{v,e} + T_c) \quad (\text{II.26})$$

Tciel : Température du ciel.

$$T_c = T_a (60 - 12) \quad (\text{II.27})$$

En générale, on utilise l'expression :

$$T_c = 0,0552(T_a)^{1,5} \quad (\text{II.28})$$

Par convection vitre-milieu ambiant :

$$Q_{L.v-a} = h_{L.v-a}(T_{v,e} - T_a) \quad (\text{II.29})$$

h cv-a : Coefficient de transfert de Chaleur par convection entre la vitre et l'extérieur.

Le coefficient d'échange par convection entre la face externe de la vitre et l'air est donné par la relation suivante (21) :

$$h_{L.v-a} = 5,7 + 3,8V \quad (\text{II.30})$$

Par convection bassin-eau :

$$Q_{c,b-a} = h_{c,b-e}(T_b - T_e) \text{ (II.31)}$$

$h_{c,b-e}$: Coefficient de transfert de Chaleur par convection entre le fond du bac et le film d'eau :

$$h_{c,b-e} = \frac{N \cdot \lambda_f}{L} \text{ (II.32)}$$

Dans ce type de problème, les corrélations expérimentales aboutissent à des relations de la forme :

$$N = c(G)^n \text{ (II.34)}$$

Avec Gr : Nombre de Grashof :

$$G = \frac{\beta \cdot g \cdot \rho^2 \cdot L^3 \cdot \Delta}{\mu^2} \text{ (II.35)}$$

Où c et n sont des constantes dépendant de la géométrie du système et de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent) :

Plaque plane horizontale :

Gradient de T vers le haut :

-l'écoulement est toujours laminaire et on a :

$$S \ G < 10^5 \Rightarrow N = 1$$

L'échange thermique entre la saumure et le bac absorbant se fait uniquement par conduction.

$$S \ 10^5 < G < 2.10^7 \Rightarrow N = \frac{\lambda_e}{L} 0,54 \cdot (G)^{0,2}$$

$$S \ G > 2.10^7 \Rightarrow N = 0,14 \cdot (G)^{0,3}$$

$$\beta: C \quad v\alpha \quad \text{ét} \quad d \ l'e \quad e \quad (K^{-1})$$

$$\rho: L \ m \quad v\alpha \quad d \ l'e \quad e \quad \left(\frac{k}{m^3}\right)$$

$$g: l'a \quad \text{élér} \quad e \quad \left(\frac{m^2}{2}\right)$$

L : Longueur du bac absorbant en (m)

$$\mu: L \ v \quad \text{é} \ d_j \quad e \quad \left(\frac{k}{m.s}\right)$$

Pr : Nombre de Prandlt :

$$P = \frac{U_e \cdot L \cdot D_e}{\lambda_e} \quad (\text{II.36})$$

Les pertes thermique du bassin par conduction thermique à travers l'isolation sont donné comme suit :

$$Q_{C : b_{i_1} : i_1} = K_b \cdot (T_b - T_{i_1 : i_1}) \quad (\text{II.37})$$

T_b : Température du bac.

T_{iso} : Température de l'isolant.

Avec :

$$K_b = \frac{\lambda_b}{\delta_b} \quad (\text{II.38})$$

λ_b : C é ther

δ_b : E

Par conduction isolant bassin :

$$Q_{C : i_1 : i_1} = \frac{\lambda_b}{\delta_b} (T_b - T_i) \quad (\text{II.39})$$

Par conduction à travers l'isolant :

$$K_i = \left(\frac{\delta_{i_1}}{\lambda_{i_1}} \right) \cdot (T_{i_1 : i_1} - T_{i_1 : e}) \quad (\text{II.40})$$

λ_{i_1} : C é d l'is

δ_{i_1} : E l'is

Par convection entre l'isolant et l'air extérieur :

$$Q_{c : i_1 : i_u} = h_{c : i_1 : e_u} (T_{i_1 : e} - T_a) \quad (\text{II.41})$$

Par rayonnement entre l'isolant et le sol :

$$h_{r : i_1 : o_s} = \epsilon_{i_1} \cdot \sigma \cdot (T_s^2 + T_{i_1 : e}^2) \cdot (T_{i_1 : e}) + T_s \quad (\text{II.42})$$

Conclusion

Le problème de la production d'eau douce par la voie solaire est important à deux points de vue : nécessité d'économiser l'énergie et souci de se procurer des nouvelles ressources hydrauliques.

Ce papier, présente l'évaluation expérimentale des principaux paramètres influençant sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire.

Les résultats obtenus ont montré que la production, l'efficacité interne et globale du distillateur solaire accroît avec l'irradiation solaire et l'augmentation de l'écart de températures ambiantes et les températures de l'eau.

Nous avons constaté que pour améliorer son rendement et le rendre performant, il faudra:

- Un gain en chaleur peut être apporté par un préchauffage de l'eau d'alimentation par un capteur plan.
- Augmenter l'angle d'inclinaison pour accélérer la condensation.
- Afin d'augmenter l'absorption, on recommande d'utiliser soit du verre d'épaisseur supérieur à 3 mm ou bien de verre armé ou du plexiglas.
- Réduire les pertes thermiques pour cela, on propose d'effectuer une isolation du bas du bac avec la laine de verre.

Références Bibliographiques :

- [1]-<https://fr.wikipedia.org/wiki/Dessalement>
- [2] MAUREL A., *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres*. 2nd ed. Lavoisier, **2006**
- [3] CASADEMONT E., ROUX de BALMANN H. (**2006**) Electrodialyse. *Techniques de l'ingénieur*. J 2 840
- [4] CASADEMONT E., ROUX de BALMANN H. (**2006**) Electrodialyse. *Techniques de l'ingénieur*. J 2 840
- [5] Source: Lenntech..... <https://www.lenntech.fr/electrodialyse.htm>
- [6] AIMAR P., BACCHIN P., MAUREL A. (**2010**) Filtration membranaire (OI, NF, UF, MFT). *Techniques de l'ingénieur*. J 2 789
- [7] livre :VAILLANT J.R., *Les problèmes du dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres*. Eyrolles, **1970**
- [8] TATA-DUCRU F. (**2009**) Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes, Agro Paris Tech ENGREF, http://www.agroparistech.fr/IMG/pdf/TATA-DUCRU_sr_final.pdf, consulté le 20/02/2012
- [9] Daymond Desjardins : « le traitement des eaux » deuxième édition 1997, pp242-249
- [10] ROSTEK ASSOCIATES, INC., TAMPA, FLORIDA « Desalting Handbook For Alanners » 3ème Edition, pp4-61
- [11] R.BERNAD, G.MERGUY, M. SCHWARTZ : « le rayonnement solaire : convection thermique et application ». Technique et documentation, deuxième édition 1980.
- [12] A. KAABI et H.ZAIDI «study and optimisation of thermo-physical parameters for a solar still performance», Proceedings of the 2nd international conference on thermal engineering theory and applications, unite Arab emirates.2006
- [13] A. KAABI et N.SMAKDJI «Impact of temperature difference (water solar collector) on solar still global efficiency» desalination, 2007.
- [14] SATCUNANATHAN AND HANSEN: « An investigation of some parameters involved in solar distillation, Solar Energy », vol. 14, pp. 353-363, 1973.
- [15] O.O. BARDAN, H.A. AL- TAHAINEH: « The Effect of Coupling a Flat-Plate Collector on The Solar Still Productivity » Presented at the Conference on Desalination and the Environment, Santa Mergherita, Italy, 22-26-May 2005.

- [16] E.Zayouti.L.Bouirden ; A.A.Haroune, M.Banouni : « Distillation Solaire : Amélioration de la condensation de la vapeur d'eau dans les distillateurs solaire » Tétouan-Maroc, FIER'2002.
- [17] J.A.Rajaonarivelo « Conception de code de calcul de simulation thermoaéraulique et hydrique de bâtiment à Madagascar : CODYMA » Thèse Université Antananarivo 2002,
- [18] **Kreith F.**, Transmission de la chaleur et thermique, (1967).