



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس – مستغانم
Abdel Hamid Ibn Badis University – Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم هندسة الطرائق
Department of Process Engineering



N° d'ordre : M2...../GC/2021

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option: Génie chimique

Thème

Distillation solaire de l'eau de mer brute et diluée

Présenté par :

1- BENDIDA Djamila

2- BENNEDJAR Nabila

Soutenu le 15/07/2021 devant le jury composé de :

Président :	Année universitaire 2020 / 2021 BESTANI Benaouda	Pr	Université de Mostaganem
Examinatrice :	MEKIBES Zohra	MAA	Université de Mostaganem
Examinatrice :	DELLALI Halima	MAA	Université de Mostaganem
Encadrant (e) :	BENDERDOUCHE Nouredine	Pr	Université de Mostaganem

Dédicaces



Je dédie ce travail à mon très cher papa MOURAD, décédé très tôt.

J'espère que t'es fier de ta fille. Puisse Dieu, le Tout-Puissant, t'avoir en sa sainte miséricorde.

A ma mère chérie KHADIDJA, je ne te remercierai jamais assez pour tes sacrifices. Que Dieu te procure bonne santé et longue vie.

A mes sœurs ZAHIA, ASMAE ET NORA.

A mon petit frère, ma tante et ma grand-mère.

A mon binôme Nabila et mes copines Aicha et Fatima.

Merci pour tout.



Djamila



Je dédie ce travail à mon père Hadj Abd Elkader,

A ma mère Noria Behilil pour tous les sacrifices consentis, pour tous les encouragements qu'elle a su m'insuffler aux moments difficiles. Je souhaite réaliser l'un de tes rêves par ce modeste travail.

À mes sœurs Chaima, Ikram, Khaira, Wissem et Bessma

À mon binôme Djamila

À ma copine Dr Fatima Lakhdari

À mon cousin Sofyane

Nabila



Remerciements

Remerciements

On remercie Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Monsieur Benderdouche Nouredine, professeur à la faculté des sciences et de la technologie. On le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent aussi au Docteur Mana Mohamed pour son aide pratique et son soutien moral et ses encouragements et à Monsieur Khouani Nadir, ingénieur de laboratoire à L'ENSA de Mostagenem.

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidées et soutenues de près ou de loin

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence de quelques paramètres, en l'occurrence, la dilution de l'eau de mer, les conditions météorologiques et la surface du corps absorbant sur le rendement d'un appareil de distillation solaire conçu et réalisé à l'université de Mostaganem. Il s'avère que la dilution de l'eau de mer et les conditions météorologiques jouent un rôle primordial sur le rendement horaire de l'appareil. En effet, lorsque la couverture nuageuse est importante, le rendement diminue drastiquement. L'augmentation de la surface du corps absorbant (corps noir) a abouti à une amélioration significative du rendement de l'appareil. L'eau distillée produite est de bonne qualité pouvant être exploitée dans divers domaines dont l'irrigation.

Abstract

In this work, we studied the influence of some parameters, namely the dilution of seawater, weather conditions and the surface of the absorbing body on the performance of a solar distillation apparatus designed and implemented at the University of Mostaganem. It turns out that the dilution of sea water and weather conditions play a major role on the hourly output of the device. Indeed, when the cloud cover is important, the yield decreases drastically. The increase in the surface area of the absorbing body (black body) has significantly improved the efficiency of the device. The distilled water produced is of good quality and can be used in various fields such as irrigation

ملخص

درسنا في هذا العمل تأثير بعض المتغيرات وهي تخفيف مياه البحر والظروف الجوية ومساحة الجسم الممتص على إنتاج جهاز التقطير الشمسي المصمم والمنفذ في جامعة مستغانم. اتضح أن تخفيف مياه البحر والظروف الجوية يلعبان دوراً رئيسياً في إنتاج للجهاز. في الواقع، عندما يكون الغطاء السحابي مهماً، ينخفض العائد بشكل كبير. أدت الزيادة في مساحة سطح الجسم الماص (الجسم الأسود) إلى تحسين كفاءة الجهاز بشكل كبير. الماء المقطر المنتج ذو نوعية جيدة ويمكن استخدامه في مجالات مختلفة مثل الري.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Ensoleillement reçu en Algérie par région climatique.....	8
Tableau 2:Rendement du distillateur pour l'eau de mer et l'eau de mer diluée	28
Tableau 3:Valeurs relevées des conditions météorologiques pour les solutions diluées.....	30
Tableau 4:Valeurs mesurées de la conductivité électrique et des chlorures de l'eau distillée	32
Tableau 5:Rendement du distillateur en fonction des conditions météo	33
Tableau 6:Rendement horaire en distillat (ml/h.m2) pour l'eau de mer et ses solutions diluées pour deux surfaces absorbées différentes.....	34

Liste des figures

Figure 1: Rayonnement solaire annuel en (kWh/m ² .an).....	6
Figure 2:Répartition spectrale du rayonnement solaire	7
Figure 3:Carte du gisement solaire de l'Algérie.....	9
Figure 4: Potentiel MENA	9
Figure 5: Production d'eau douce sur les navires	11
Figure 6: Principe de distillation à simple effet.....	13
Figure 7: Procédé de dessalement par la distillation à multiples effets	14
Figure 8: Compression de la vapeur.....	15
Figure 9: Distillateur solaire simple à pente unique	16
Figure 10: Distillateur solaire simple à double pente.....	17
Figure 11:Distillateu solaire sphérique	18
Figure 12:Distillateur solaire incliné à cascades	19
Figure 13:Distillateur solaire à film capillaire	20
Figure 14:Distillateur solaire à mèche.....	21
Figure 15:Distillateur solaire vertical.....	22
Figure 16: schéma de distillateur solaire étudié.....	24
Figure 17:Evolution des températures des différents endroits du distillateur solaire	27
Figure 18 : Production d'eau distillée à partir de l'eau de mer (EMB) et l'eau de mer diluée à divers taux.....	29
Figure 19 : Couverture nuageuse relevée lors de la distillation solaire des diverses solutions d'eau de mer.....	31
Figure 20 : Température extérieure relevée lors de la distillation solaire des diverses solutions d'eau de mer.....	31
Figure 21 : Rendement horaire du distillateur pour deux journées de conditions météo différentes (eau de mer diluée 1.75 fois)	33

TABLE DES MATIERES

Dédicaces	
Remerciements.....	
Résumé.....	
Introduction	1
Chapitre I : Généralités sur le soleil et l'énergie solaire.....	4
I.1. Le soleil.....	5
I.2. Énergie solaire.....	5
I.2.1. Rayonnement solaire.....	6
I.2.2. Spectre solaire	7
I.3. Potentiel solaire en Algérie.....	8
Chapitre II : Types de distillateur solaire.....	10
II.1. La distillation.....	11
II.2. Origine du dessalement.....	11
II.3. Les différents procédés de dessalement	12
II.3.1. La distillation à simple effet [SED].....	12
II.3.2. La distillation à multiples effets [MED]	13
II.3.3. La distillation avec vaporisation instantanée à étages multiples ou par Détentes successives [MSF]	14
II.3.4. La distillation avec compression de la vapeur (thermo compression) [VC]	14
II.4. Distillation solaire	15
II.4.1. Historique	15
II.4.2. Les types de distillateur solaire	16
Chapitre III : Matériel & Méthodes.....	23
III. 1. Matériel utilisé	24
III.1.1. Principe.....	24
III.1.2. Méthodes.....	25
III.1.2.1. Mesure de la conductivité	25
III.1.2.2. Dosage des chlorures	25
Chapitre IV : Résultats & discussions.....	26
IV.1. Évolution de la température à l'intérieur du distillateur	27
IV.2. Effet de la dilution de l'eau de mer sur le rendement de l'appareil.....	28
IV.3. Effet des paramètres météorologiques sur le volume et la production horaire du distillat	30
IV. 4. Qualité de l'eau distillée obtenue	32
IV.5. Effet de la surface de l'absorbeur.....	34



Conclusion	35
Références	

Introduction

Introduction

La pérennité de l'espèce humaine dépend étroitement de la disponibilité des ressources en eau, l'eau recouvre 72% de la surface de la planète dont 97% d'eau salée et 3% de cette eau est douce, dont 2,2% contenue dans les glaciers et les nappes phréatiques. Il reste donc moins de 1% de l'eau contenue sur la terre pour répondre aux besoins de toutes les espèces vivantes [1]. Or l'accroissement de la population et l'augmentation du niveau de vie des pays émergents entraînent de véritables problèmes de quantité et qualité de l'eau disponible.

Un déficit hydrique global de plusieurs millions de m^3/J dans les années à venir est prévisible dû en partie aux bouleversements du climat causés par les activités anthropiques libérant dans l'atmosphère des quantités considérables des gaz à effet de serre, dont le dioxyde de carbone et le méthane. Certains pays seront confrontés à un stress hydrique accentué engendrant une baisse de la qualité de la vie et une mise en danger de leurs populations. Des solutions sont apportées pour satisfaire les besoins vitaux de ces populations pour produire de l'eau douce en faisant appel aux énergies renouvelables dont notre planète abonde.

L'Algérie est un pays semi-aride disposant de ressources en eau potable limitées. La majorité des eaux disponibles est saumâtre et souterraine, profonde et difficilement exploitable. Le Programme des nations unies pour l'environnement (PNUE) atteste que l'eau disponible en Algérie est en dessous du seuil de rareté fixé à 1000 m^3 par habitant [2].

L'Algérie dispose de ressources hydriques salines considérables, d'un littoral de 1200 km et d'un gisement solaire très important et se doit donc d'explorer les techniques solaires pour dessaler (désaliniser) ces eaux pour répondre aux besoins croissants de la population en matière d'eau potable et d'irrigation.

L'application de l'énergie solaire, entre autres énergies renouvelables, connaît un essor fulgurant depuis quelques années dans de nombreux pays occidentaux, la chine, etc.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressées à l'étude de l'effet de quelques paramètres sur la quantité et la qualité de l'eau produite par distillation solaire simple en utilisant un appareil de distillation réalisé par l'équipe des matériaux carbonés du laboratoire Structure, Elaboration et Application des Matériaux Moléculaires (SEA2M). L'eau initiale à dessaler est l'eau de mer.

Le présent manuscrit se décline en trois chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur le soleil et l'énergie solaire (différentes transformations) ; suivi par une définition du rayonnement solaire, et le potentiel solaire en Algérie

Le deuxième chapitre expose une étude générale sur la distillation solaire et décrit les caractéristiques et le principe de fonctionnement des différents types de distillateurs.

Le troisième chapitre présente les matériels et les méthodes utilisés au cours de cette étude.

Le quatrième chapitre présente les différents résultats obtenus et leurs interprétations au cours du fonctionnement de ce distillateur.

Une conclusion générale est tirée de ce travail.

Chapitre I : Généralités sur le soleil et l'énergie solaire

I.1. Le soleil

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique de composition gazeuse, mélange d'hélium et d'hydrogène en proportion de (80 % H₂, 19 % He, 1 % d'autres éléments), son diamètre est d'environ 1392000 km, avec une masse de l'ordre de 2×10^{30} kg, son âge est d'environ 4,6 milliards d'années. Sa distance moyenne de la terre est de 149597870 km. Le soleil a une densité moyenne de 1,4 kg/L. La masse du soleil représente 99,85 % de la masse totale du système solaire et 33104 fois celle de la terre. La température au cœur est de l'ordre 10^7 K. La surface terrestre reçoit environ 492 W/m² dont 168 W/m² proviennent du rayonnement solaire parvenant à la surface terrestre et 324 W/m² de l'atmosphère sous forme de rayonnement infrarouge.

I.2. Énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le soleil sous forme de lumière et de chaleur. Des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible, tous ces rayonnements sont constitués de photons, les composants fondamentaux de la lumière et les vecteurs de l'énergie solaire. L'énergie solaire est issue des réactions de fusion nucléaire qui animent le Soleil. L'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie, elle représente un potentiel considérable. En effet, la terre reçoit plus de 3000 h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement. Avec une optimisation des angles de réception, la moyenne annuelle journalière est de 5 à 7 kWh/m²/jour. L'énergie solaire est la source de la plupart des énergies renouvelables et des énergies fossiles. Elle est responsable de la mise en mouvement des masses d'eau (énergies marines) et d'air (énergie éolienne), du cycle de l'eau (énergie hydraulique) et de la photosynthèse (biomasse et hydrocarbures). D'autres types d'énergie n'émanent pas de l'énergie solaire : L'énergie marémotrice, l'énergie géothermique et l'énergie nucléaire.

I.2.1. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique composé essentiellement :

- de lumière visible de longueur d'onde comprise entre 400 nm et 800 nm,
- de rayonnement infrarouge (IR) de longueur d'onde inférieure à 400 nm,
- de rayonnement ultraviolet (UV) de longueur d'onde supérieure à 800nm [3].

La Figure 1 illustre le rayonnement solaire annuel sur la planète.

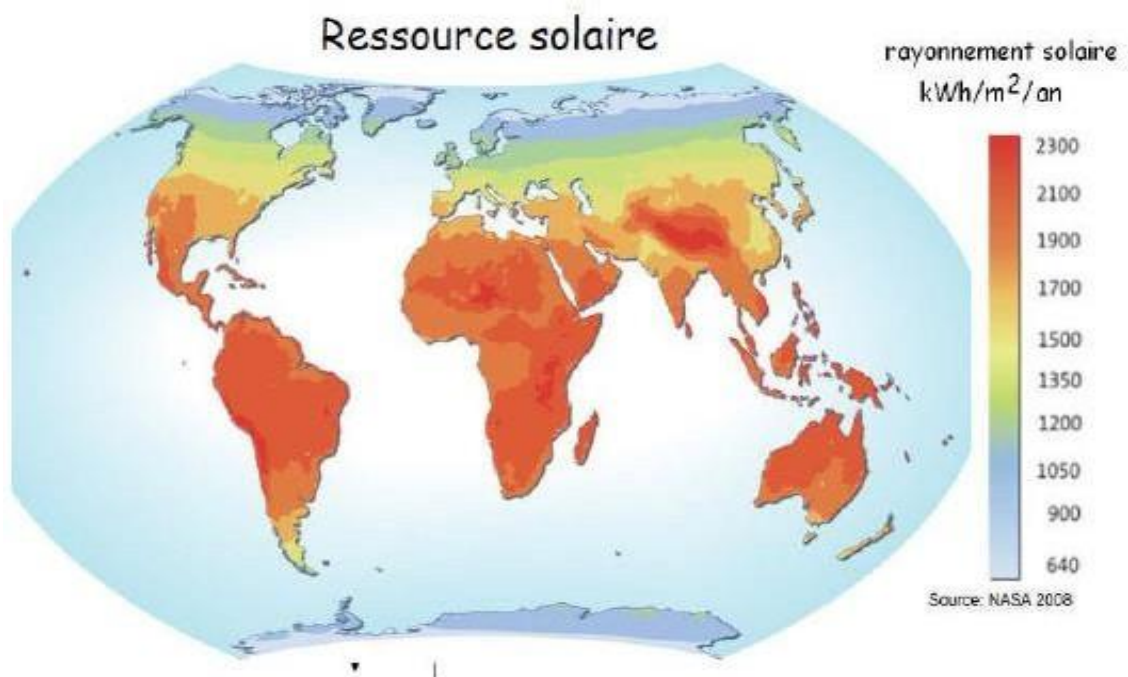


Figure 1: Rayonnement solaire annuel en (kWh/m².an)

Le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. Il produit à la surface, mais en dehors de l'atmosphère terrestre, un éclairement énergétique à peu près constant et égal à 1370 W/m^2 appelé de ce fait : constante solaire I_{cs} .

Pour atteindre chaque point de la surface éclairable du globe terrestre, les rayons solaires traversent l'atmosphère qui dissipe une partie de l'énergie provenant du soleil par :

- Diffusion moléculaire (en particulier pour les radiations U.V.)
- Réflexion diffuse sur les aérosols atmosphériques (gouttelettes d'eau, poussières...)
- Absorption sélective par les gaz de l'atmosphère.

L'atténuation correspondante du rayonnement solaire dépend de l'épaisseur de l'atmosphère qui dépend à son tour de la latitude du lieu considéré et du temps.

A la surface de la terre, le rayonnement solaire global est la somme des rayonnements :

- Direct, ayant traversé l'atmosphère,
- Diffus, en provenance de toutes les directions de la voûte céleste.

Une surface exposée reçoit ainsi du rayonnement direct et diffus mais elle reçoit en plus une partie du rayonnement global réfléchi par les objets environnants, en particulier par le sol, dont le coefficient de réflexion est appelé « albédo » [4].

I.2.2. Spectre solaire

Les réactions thermonucléaires qui se produisent au sein du soleil, provoquent l'émission d'onde électromagnétique de très forte puissance ou rayonnement thermique solaire. Le rayonnement ou spectre solaire se présente sensiblement comme celui d'un corps noir à 5800 K. La répartition spectrale du rayonnement solaire est illustrée sur la Figure 2.

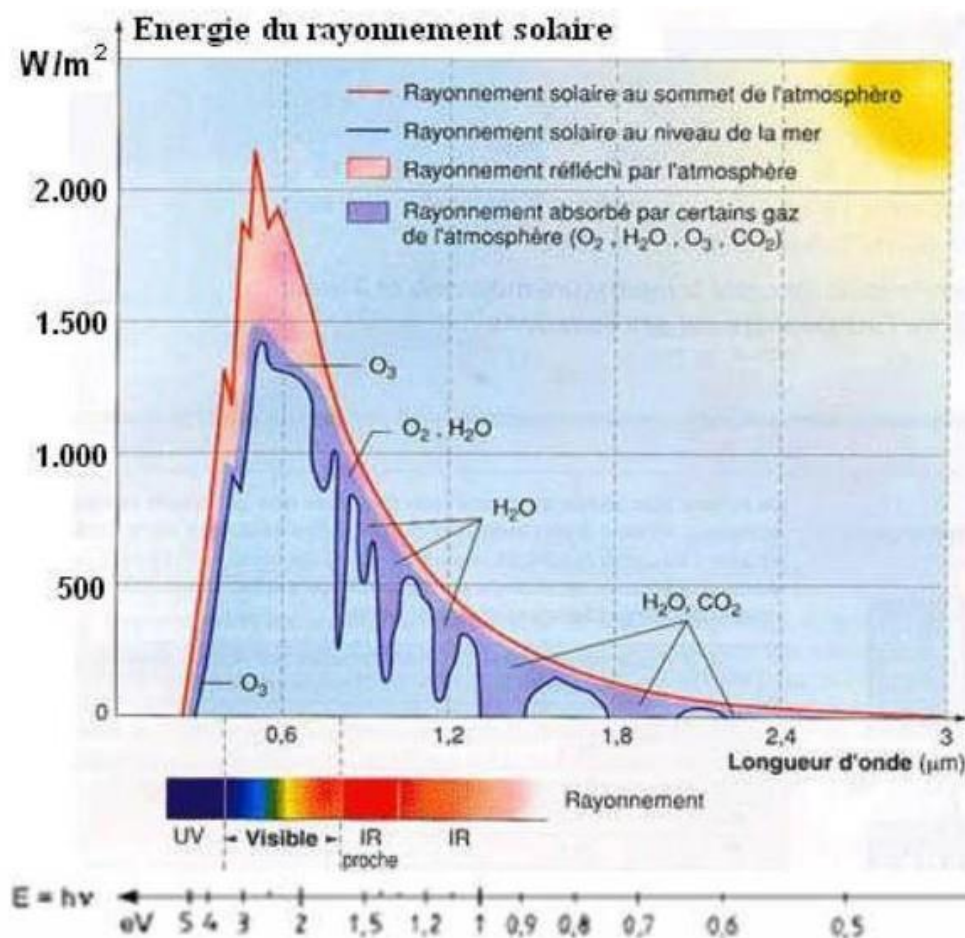


Figure 2: Répartition spectrale du rayonnement solaire

Le domaine de longueur d'onde utile pour les applications solaires est situé entre 0,25 μm et 2,5 μm , l'énergie émise dans cette bande (contenant les zones UV, Visible et IR) représente 95% environ du total. Mais en traversant l'atmosphère l'énergie radiative solaire est atténuée par absorption et diffusion et l'énergie enregistrée au niveau de la mer est l'ordre de 1000 W/m^2 [5].

I.3. Potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme. Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau ci-dessous selon l'ensoleillement reçu annuellement :

Tableau 1 : Ensoleillement reçu en Algérie par région climatique

Région	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie(%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue ($\text{kWh/m}^2.\text{an}$)	1700	1900	2650

L'Algérie est un pays qui possède une richesse d'ensoleillement considérable. La durée d'insolation dans le Sahara algérien, de l'ordre de 3500 h/an, est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8 h/j et peut arriver jusqu'à 12 h/j pendant l'été. La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie (Voir Figure 3).

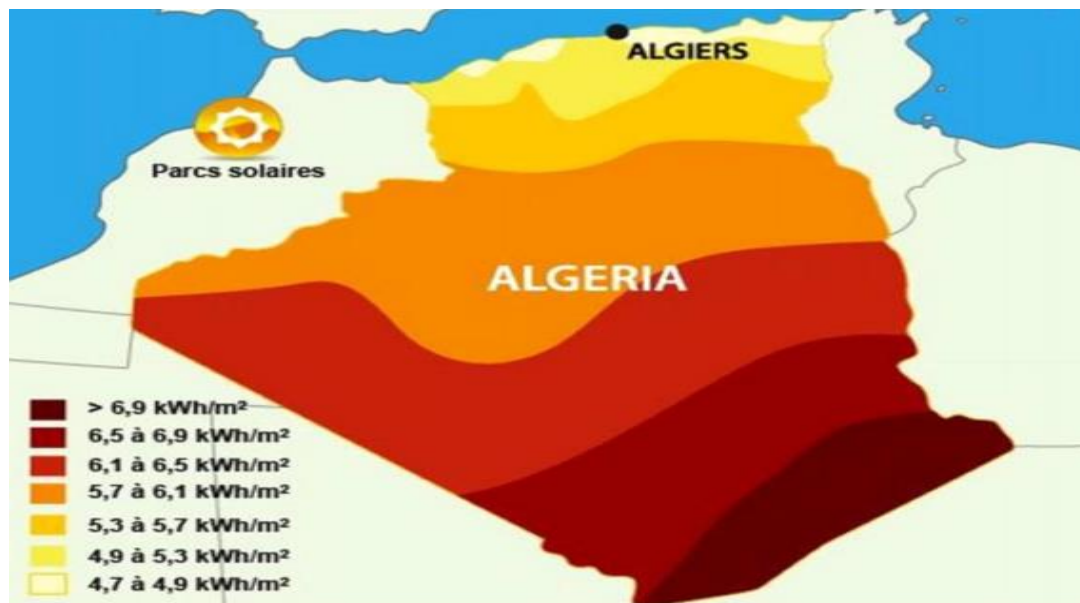


Figure 3: Carte du gisement solaire de l'Algérie

Notre pays dispose du potentiel solaire le plus élevé de la région du MENA (en anglais Middle East and North Africa) et l'un des plus importants au Monde [6]. La Figure 4 montre le potentiel de concentration solaire (Concentrating Solar Power (CSP)) de quelques pays de la région MENA par rapport à l'Espagne.

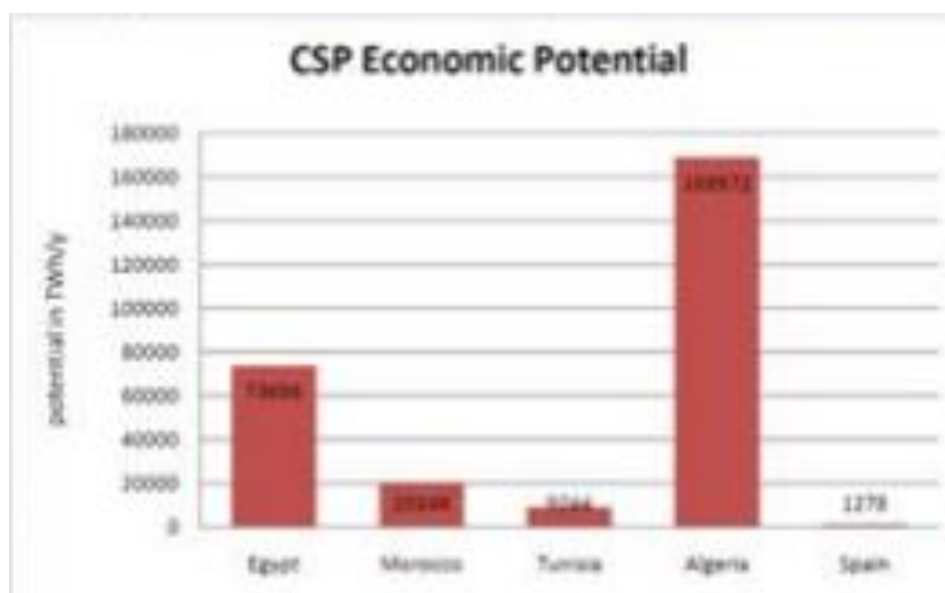


Figure 4: Potentiel MENA

Chapitre II : Types de distillateur solaire



II.1. La distillation

La distillation permet de séparer divers constituants d'un mélange grâce à leur différente volatilité. La séparation ou le fractionnement de ces constituants se fait en fonction de leur température d'ébullition.

II.2. Origine du dessalement

La formation d'eau douce à partir d'eau de mer se fait depuis toujours à travers le cycle naturel de l'eau. En effet, dans la nature, de la vapeur d'eau se forme à partir de l'évaporation des océans, sous l'action du soleil, et forme ainsi des nuages qui provoquent de la pluie ou de la neige lorsque qu'ils atteignent des régions plus froides. Le dessalement d'eau de mer fonctionne sur ce même principe, l'eau de mer chauffée produit de la vapeur d'eau qui, une fois liquéfiée, permet d'obtenir de l'eau douce, le sel n'étant pas volatil. Ce principe de dessalement est utilisé depuis l'antiquité pour l'approvisionnement d'eau potable à bord des navires. Les marins, en portant l'eau de mer à ébullition, liquéfiaient la vapeur produite sur de larges éponges froides [7]. Ils pouvaient ainsi récupérer de l'eau douce à partir des éponges comme le montre la figure suivante :

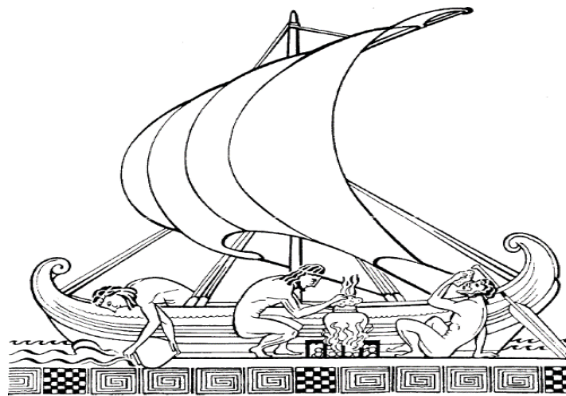


Figure 5: Production d'eau douce sur les navires

Le dessalement par distillation a été pratiqué depuis plus de 2000 ans. C'est à partir du 18^{ème} siècle qu'il a été observé qu'il était possible d'améliorer les performances des processus de distillation en économisant l'énergie, en augmentant la production et en augmentant la pureté de l'eau produite [8]

Les procédés membranaires, consistant à extraire de l'eau douce à partir d'eau salée au travers d'une membrane semi-perméable notamment sous l'action d'une pression, sont quant à eux apparus plus tardivement. Bien que le phénomène ait été mentionné par Plin en 1977, le procédé d'osmose inverse



a vu le jour autour de 1959 à l'Université de Californie [9] dans la continuité de la méthode de séparation des sels contenus dans les mélasses [10].

Les deux grandes familles de procédés utilisés pour le dessalement d'eau de mer, mentionnées ci-dessus, ont surtout été développées de manière industrielle à partir de la moitié du 20^{ème} siècle. Depuis, les intérêts académiques et industriels ont été décuplés permettant ainsi de rendre ce moyen de production d'eau douce fiable, performant et à des coûts minimalisés.

II.3. Les différents procédés de dessalement

Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, par les différents procédés existant, a connu un développement important ces dernières années en raison de la rareté des ressources hydriques, de la pollution et du changement climatique. Parmi les procédés les plus connus, figurent les processus de distillation thermique comme [11] :

- La distillation à simple effet (simple effect distillation [SED]).
- La distillation à multiples effets (multiple effect distillation [MED]).
- La distillation à multiples étages (multiple stage flash [MSF]).
- La distillation par compression de la vapeur (vapor compression [VC]).

II.3.1. La distillation à simple effet [SED]

Une circulation de vapeur permet de chauffer dans un évaporateur l'eau salée, qui s'évapore sous une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique, on peut alors condenser directement la vapeur sortant de l'évaporateur, sans récupération de la chaleur de condensation, ou bien, au contraire, on peut envoyer la vapeur dans un condenseur en vue du préchauffage de l'eau salée qui arrive dans l'installation. La Figure 7 décrit le principe de distillation à simple effet.

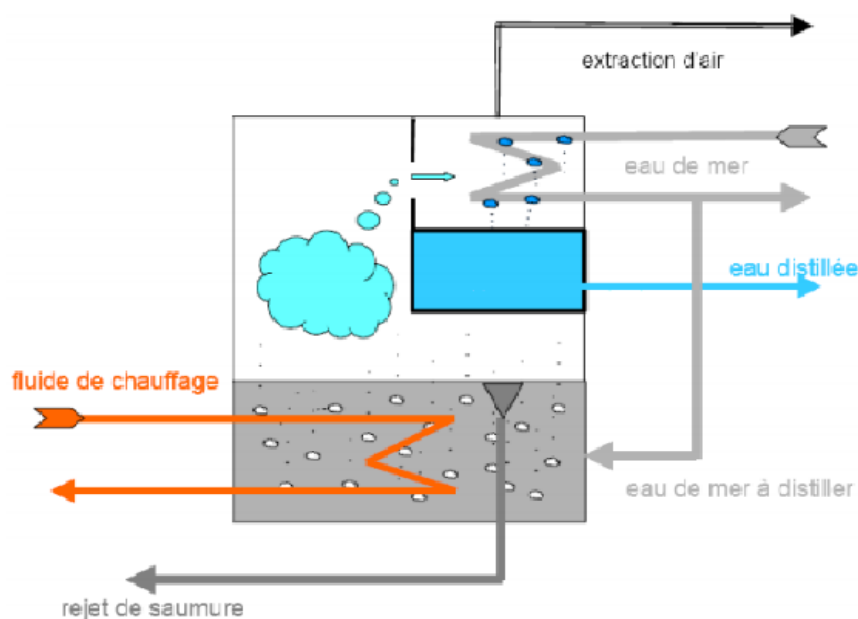


Figure 6: Principe de distillation à simple effet

II.3.2. La distillation à multiples effets [MED]

Pour augmenter le rendement de l'opération, il est souhaitable de récupérer la chaleur de condensation et de l'utiliser comme chaleur d'apport pour une nouvelle distillation, on réalise alors plusieurs effets en cascade, la chaleur résiduelle est récupérée et utilisée pour le chauffage de l'eau brute à traiter. Dans les industries de traitement divers, on réunit ainsi jusqu'à six ou sept évaporateurs – condenseurs (le premier évaporateur et le dernier condenseur ayant une seule fonction), et peut être combinée avec une centrale électrique thermique. Du point de vue technologique deux types peuvent être utilisés à long tube vertical (LTV) inventé en 1905 par le français KESTNER ou à tube horizontal.

Pour fixer le nombre d'effets, on tient compte de la différence globale de température disponible entre la source chaude et froide, et du gradient de température nécessaire dans chaque évaporateur pour assurer efficacement la transmission de chaleur de la vapeur de chauffe à l'eau saline à distiller. Il dépend aussi du prix de revient de la vapeur d'alimentation, donc du coût de combustible employé [11]. La Figure 8 décrit le procédé de dessalement par distillation à multiples effets.

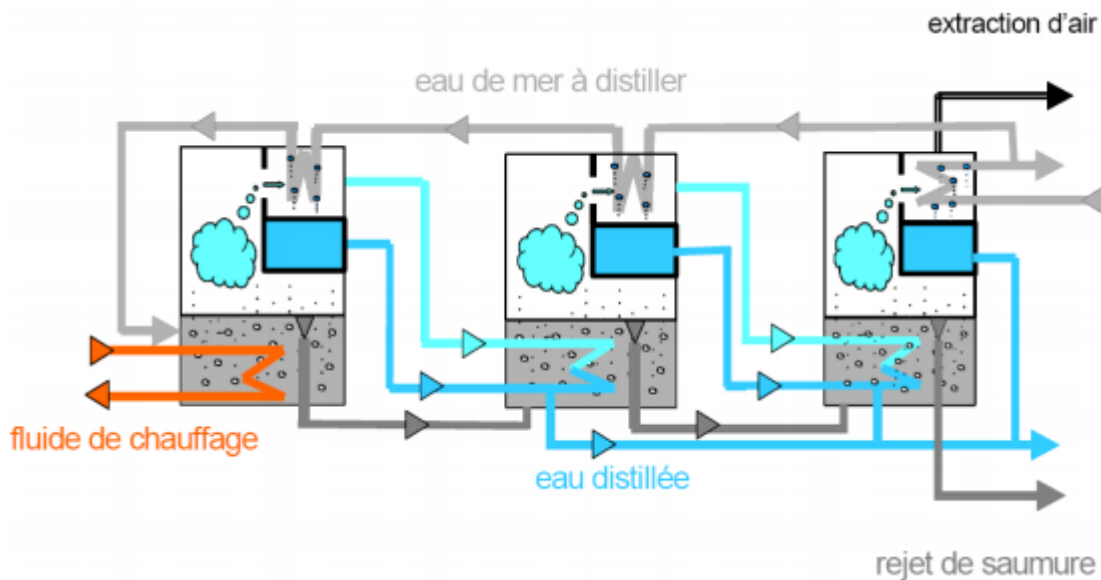


Figure 7: Procédé de dessalement par la distillation à multiples effets

II.3.3. La distillation avec vaporisation instantanée à étages multiples ou par Détentes successives [MSF]

L'installation comprend un certain nombre d'enceintes ou cellules, thermiquement isolées disposées en série dans lesquelles se produit la vaporisation instantanée par détente. L'eau saline à traiter est chauffée sous pression, sans évaporation, puis introduit dans les cellules sous vide partiel ou elle circule successivement, à chaque étage la vapeur produit par détente et va se condenser a la partie supérieure au contact d'un faisceau tubulaire dans lequel l'eau d'alimentation circule [11].

II.3.4. La distillation avec compression de la vapeur (thermo compression) [VC]

L'eau salée arrive dans un évaporateur, où elle se vaporise aux environs de 100°C grâce à un serpentin auxiliaire de vapeur qui est ensuite mis hors circuit. La vapeur d'eau à la pression atmosphérique et vers 100°C est alors aspirée par un compresseur qui la porte à une pression relative de l'ordre de 0,2 bar, avec une surchauffe de l'ordre de seulement 6°C, la vapeur surchauffée passe ensuite dans le serpentin principal de l'évaporateur où elle se condense (Voir Figure 9).

Les avantages de la thermocompression sont son haut rendement, on peut retirer environ 0,8 m³ d'eau douce de 1 m³ d'eau brute.

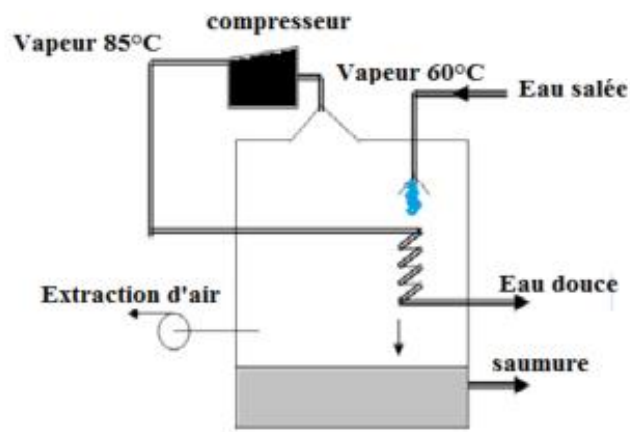


Figure 8: Compression de la vapeur

II.4. Distillation solaire

II.4.1. Historique

La distillation de l'eau grâce à un apport de chaleur pour l'obtention d'eau douce à partir d'eau salée est un procédé très ancien, ce procédé élimine également les impuretés telles que le sel, les métaux lourds et les microorganismes. En fournissant de l'énergie à un système de dessalement, sous forme de chaleur (procédé thermique) ou sous forme de travail mécanique (procédé par compression de vapeur), une partie de l'eau salée est vaporisée. Le sel n'étant pas volatil, on obtient ainsi de l'eau douce en liquéfiant la vapeur produite.

Comme il a été dit plus haut, la distillation solaire est une technologie très ancienne qui date de plus de 2000 ans. Les premiers à avoir conçu des appareils pour distiller l'eau étaient les alchimistes Arabes en 1551 où des miroirs concaves servant à concentrer les rayons solaires étaient utilisés pour la distillation [12]. Della Porta en 1589 a utilisé de larges pots de terre exposés aux rayons solaires pour évaporer l'eau des feuilles et rassembler le condensat dans des vases placés au-dessous. Lavoisier en 1861 a utilisé de larges lentilles en verre pour concentrer les rayons solaires afin de distiller de l'eau.

Le premier distillateur solaire conventionnel à grande échelle a été construit en 1872 dans les mines de nitrates du nord du Chili. Le modèle a été fabriqué par Carlos Wilson, un ingénieur Suédois avec une surface vitrée de 5000 m², produisant jusqu'à 20 m³ d'eau douce par jour, à partir d'une eau saline. Ce distillateur a été abandonné en 1910 à cause de l'accumulation du sel dans le bassin [13]. Au début du 1930, une nouvelle conception, d'un distillateur incliné, a été proposée en Russie par Trofimov [14]. Durant la 2^{ème} guerre mondiale, Maria Telkes développa des distillateurs solaires sphériques pour la marine et les forces aériennes américaine [15]. En 1953 en Algérie, Cyril Gomella [16] a

développé plusieurs types de distillateurs solaires (plus de 20 distillateurs ont été testés) et certains d'entre eux, ont été commercialisés à travers l'Afrique du Nord, le Sénégal et l'Australie.

II.4.2. Les types de distillateur solaire

a. Distillateur à pente unique

Dans un distillateur solaire conventionnel simple de type inclinée, le bassin reçoit le rayonnement solaire à travers une couverture transparente, qui est par la suite absorbé par la plaque absorbante au fond du bassin et converti en chaleur qui sera transférée à l'eau qui s'échauffe puis avec le temps elle s'évapore, cette vapeur chaude monte saturée, puis subit un mouvement circulaire, en raison de la différence de température entre la surface de l'eau et celle de la couverture inférieure, avant d'atteindre la vitre refroidie d'où sa condensation, puis elle glisse vers le bas de la vitre d'où elle est

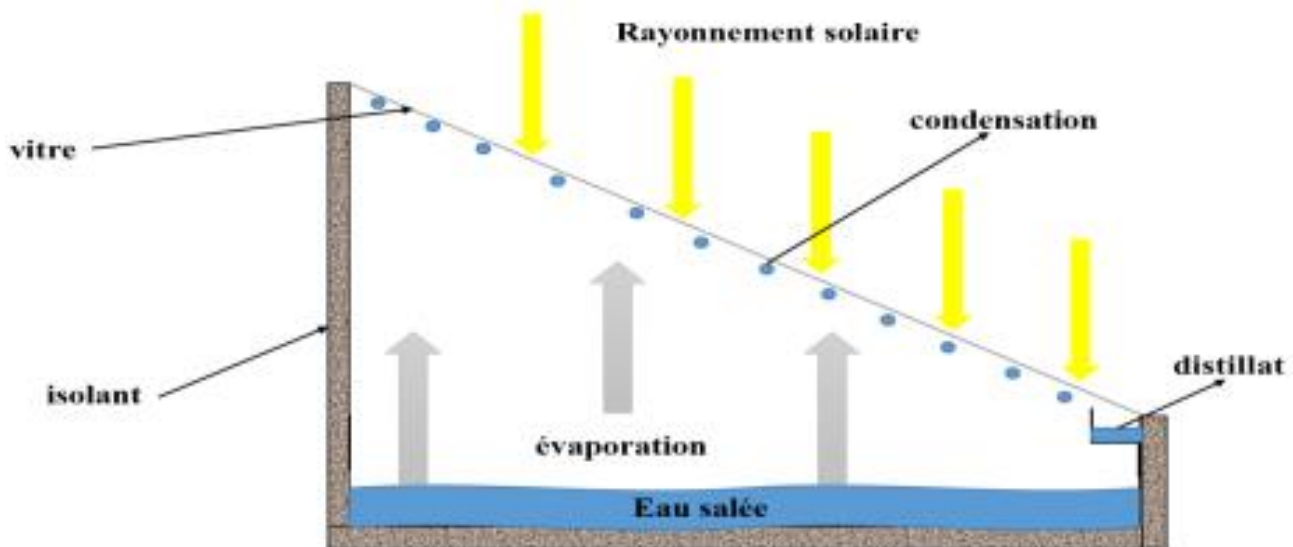


Figure 9: Distillateur solaire simple à pente unique

recueillie à l'aide d'un drain [17]. Dans ce type de distillateur à simple effet, la chaleur latente de condensation est épuisée avec l'expiration de l'eau distillée (l'évacuation)

b. Distillateur à double pente

C'est un distillateur simple mais à double couverture verrière. Chaque couverture est inclinée d'un angle (β), Son avantage est d'exposer l'un de ses cotés au soleil et l'autre à l'ombre pour accélérer la condensation [18]. La figure suivante schématise ce genre de distillateur.

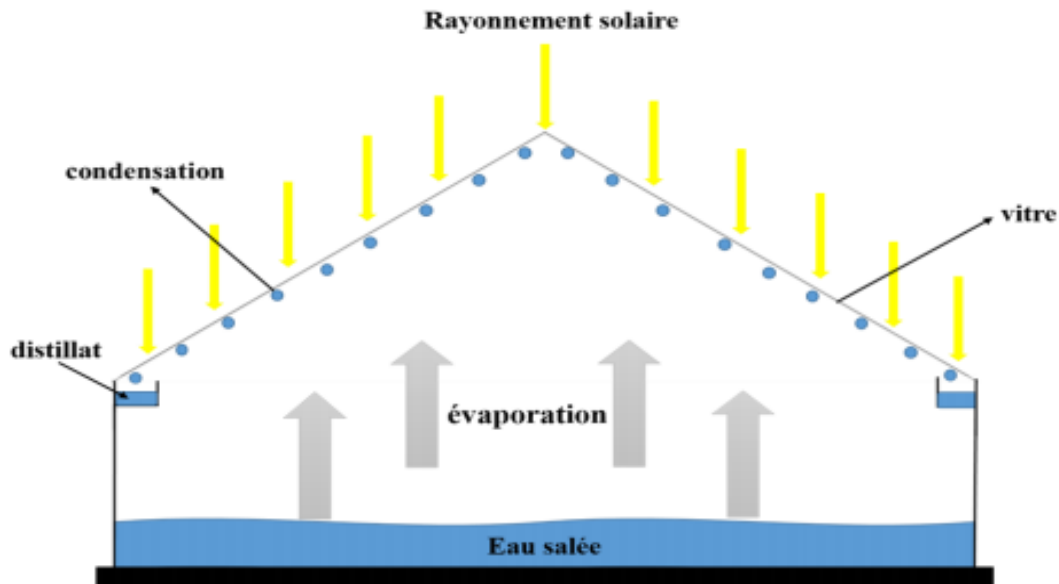


Figure 10: Distillateur solaire simple à double pente

c. Distillateur sphérique à balayage

C'est un distillateur en plexiglas ou autres matériaux plastiques transparents reposant sur des supports, il est essentiellement constitué par trois parties, une demi sphère supérieure qui sert à transmettre le rayonnement solaire d'une part, et joue le rôle de surface de condensation d'autre part, une demi-sphère inférieure qui sert à récupérer le distillat, un bac horizontal en métal noir contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian de la sphère [19].

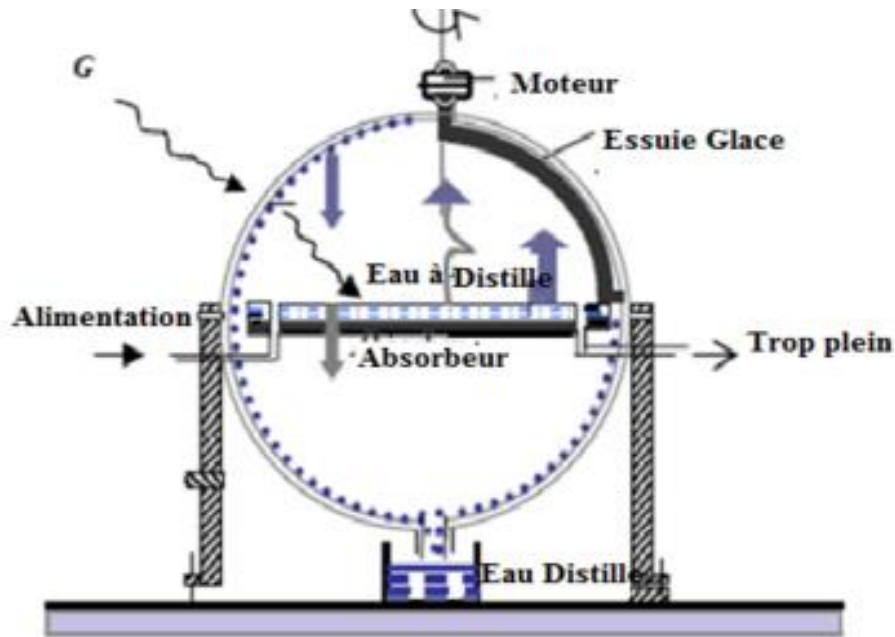


Figure 11: Distillateur solaire sphérique

d. Distillateur solaire à cascades

Ce système est caractérisé par deux avantages principaux par rapport au distillateur plan qui sont :

- La réduction de l'inertie thermique sous l'effet de la répartition de la charge d'eau saumâtre sur plusieurs marches en cascades.

- La possibilité de concevoir des distillateurs inclinés pour intercepter le maximum de rayonnement solaire. Ces avantages permettent d'améliorer la production du distillateur de 10 à 20 % par rapport au distillateur plan. Un modèle de ce type, n'a été exécuté qu'en petites tailles.

Ces appareils fonctionnent bien mais leur construction et leur entretien sont coûteux [20].

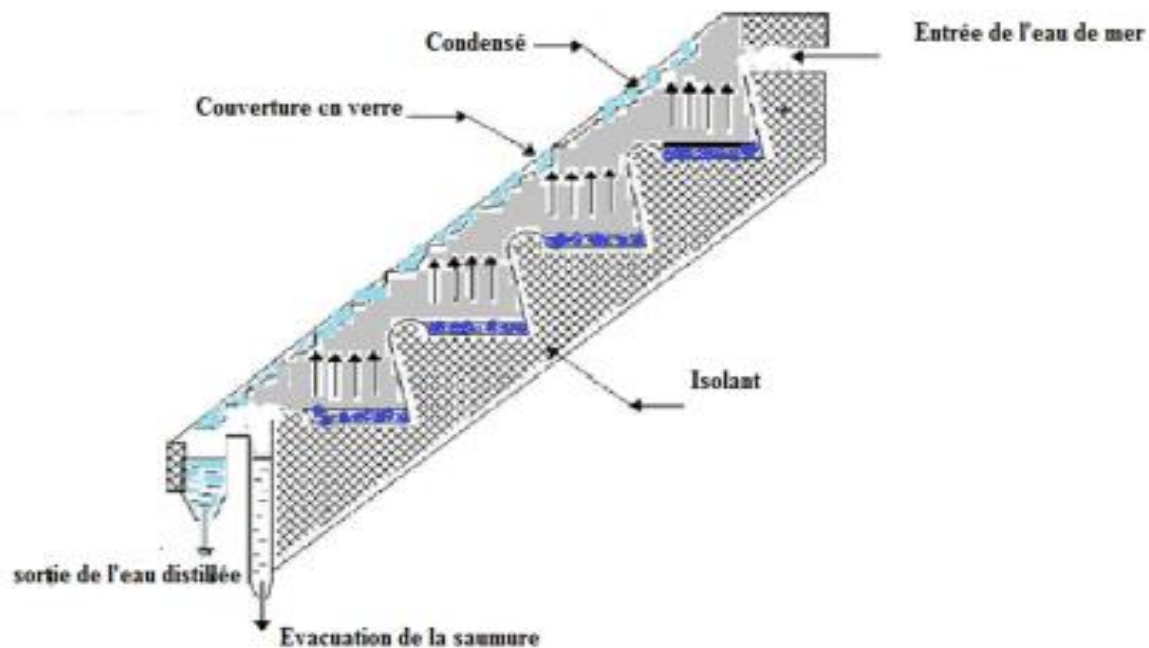


Figure 12: Distillateur solaire incliné à cascades

e. Distillateur solaire à film capillaire

Le système se compose d'une très mince couche de textile à mailles fines, trempée d'eau qui se fixe d'elle-même au contact de la plaque jouant le rôle d'évaporateur.

Les forces de tension interraciale, nettement supérieures à celles de la pesanteur, jouent un rôle très important dans la formation du film capillaire, de faible inertie thermique, en empêchant toute formation de bulles d'air. Ce distillateur est composé des éléments suivants :

le capteur-évaporateur, le condenseur et l'alimentation. La première cellule capte le rayonnement solaire qui passe à travers la couverture. La vapeur se condense sur la paroi opposée et la chaleur dégagée par cette condensation permet l'évaporation du film qui ruisselle sur l'autre face de cette même paroi. [20]

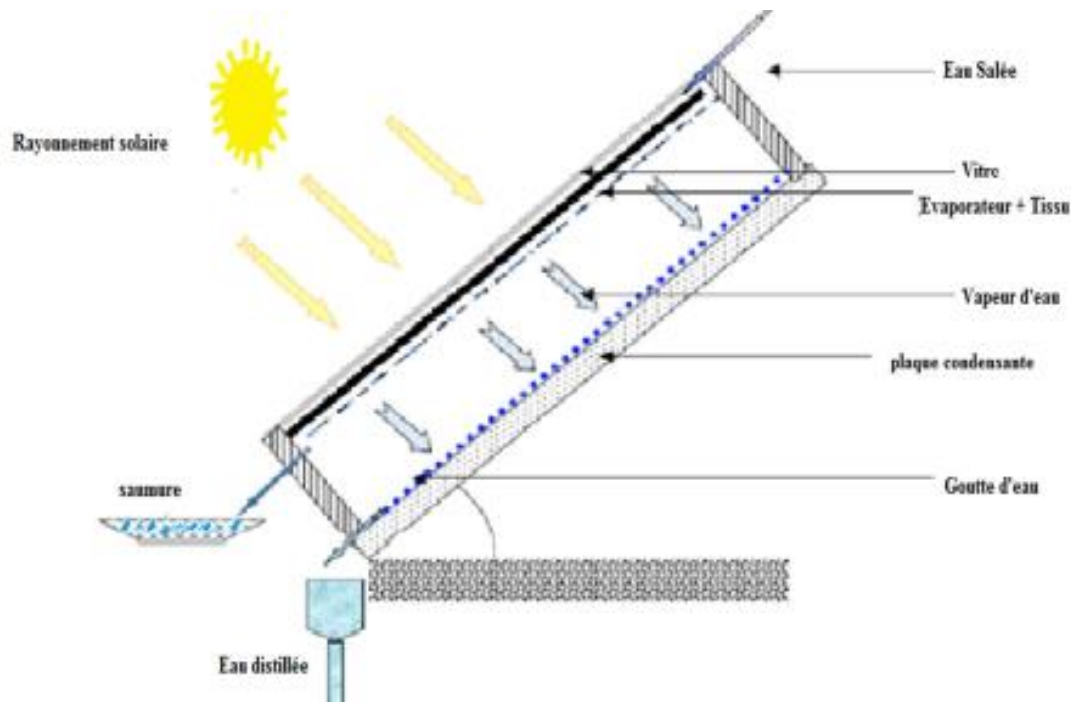


Figure 13: Distillateur solaire à film capillaire

f. Distillateur solaire a mèche

Pour cet appareil, l'eau d'alimentation coule lentement à travers une garniture perméable, absorbant le rayonnement solaire. Le système favorise la production par autre système de distillateurs (distillateur de bassin). La mèche peut être inclinée de sorte que l'eau d'alimentation présente un meilleur angle avec le soleil (présentant une grande surface efficace et réduisant la réflexion). Moins d'eau d'alimentation pour le distillateur à tout moment et donc l'eau chauffée plus rapidement à une température élevée. Les distillateurs à mèche sont plus efficaces que les distillateurs à bassin [21].

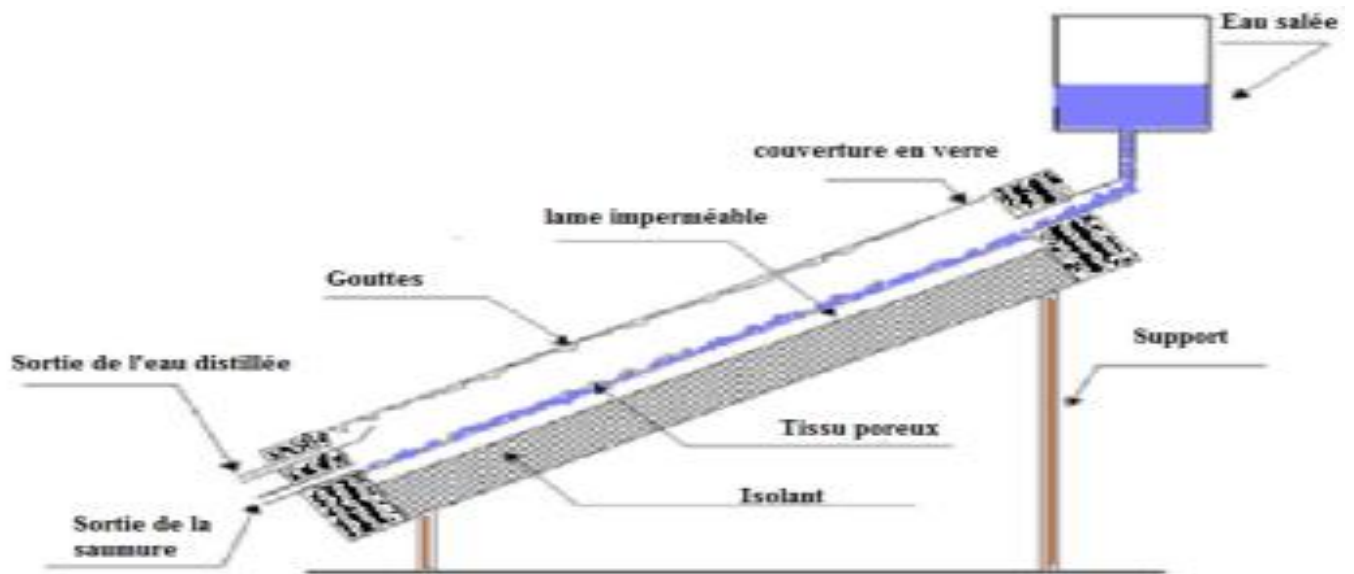


Figure 14: Distillateur solaire à mèche

g. Distillateur solaire vertical

Le distillateur vertical est alimenté directement à l'aide d'un réservoir connecté directement dans la partie supérieure à travers d'un tube en cuivre, munie d'une vanne régulatrice de débit d'eau, la position du réservoir permet l'alimentation du distillateur par un débit d'eau constant. Pour une meilleure distribution de l'eau d'alimentation un tube perforé est fixé sur sa longueur supérieure qui permet la distribution d'eau en film sur le tissu spongieux, l'eau ruisselle sur le tissu et la saumure est évacuée en bas. L'eau s'évapore dans le compartiment d'évaporation derrière l'absorbeur et le mélange d'eau et d'air à l'intérieur saturé en vapeur d'eau circule d'une façon naturelle à travers les deux ouvertures réalisées dans une cloison isolée vers le compartiment de condensation, et la vapeur se condense au contact de la plaque de condensation à l'arrière du distillateur. La collecte de l'eau se produit dans la gouttière fabriquée en dessous de la plaque de condensation. [22].

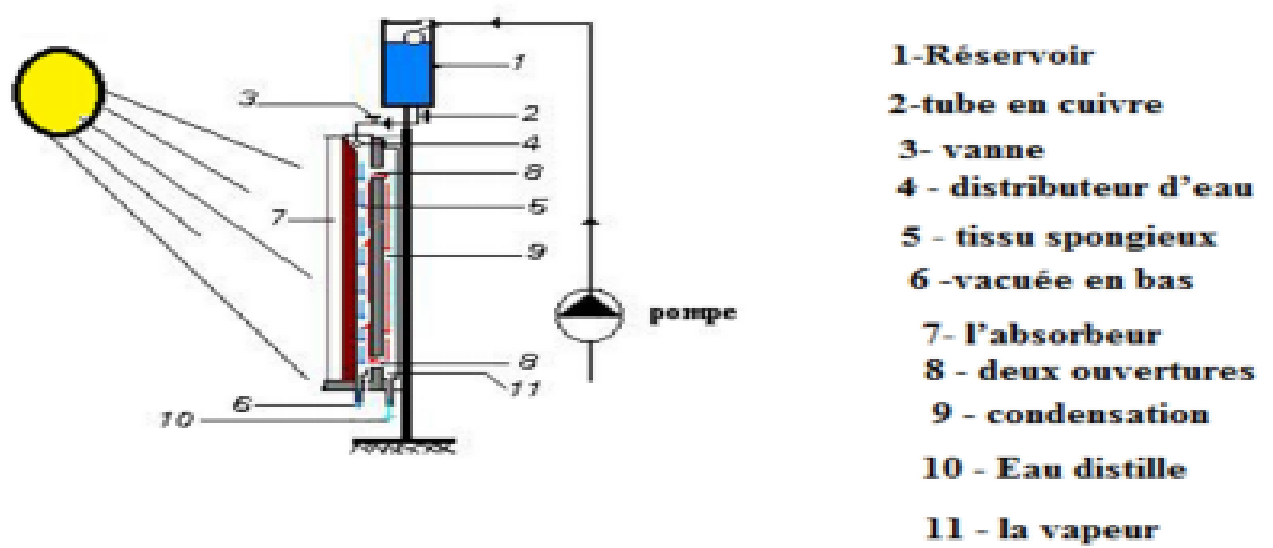


Figure 15:Distillateur solaire vertical

Chapitre III : Matériel & Méthodes

III. 1. Matériel utilisé

Le matériel expérimental utilisé dans cette étude consiste en un distillateur solaire fourni par le laboratoire SEA2M de l'Université de Mostaganem. La Figure 16 montre une photographie de externe de l'appareil.

Il se compose des éléments suivants:

- une couverture verrière
- un absorbeur d'une surface de $0,41 \text{ m}^2$
- un isolant thermique
- un scellement
- deux gouttières



Figure 16: schéma de distillateur solaire étudié

III.1.1. Principe

L'eau est ajoutée manuellement ou de façon automatique par un système à flotteur. L'énergie solaire traversant les deux vitres externe et interne de l'enceinte du distillateur fait chauffer la solution (eau de mer brute, ou diluée) et provoque l'évaporation de l'eau. La vapeur d'eau produite se condense sur la face interne de la vitre qui est relativement plus froide. L'eau condensée ainsi s'écoule dans la gouttière solidaire et est évacuée vers un récipient externe de stockage dédié à cet effet.

III.1.2. Méthodes

La méthode consiste à étudier l'effet des paramètres suivants sur le rendement de l'appareil en nombre de litres par mètre carré par heure pendant la durée d'ensoleillement :

- Effet de la dilution de l'eau de mer
- Effet des conditions météo
- Effet de la surface de l'absorbeur

Par ailleurs, en plus de la quantité de l'eau distillée produite exprimée par le rendement, nous avons eu à suivre la qualité de l'eau en mesurant sa conductivité électrique et la concentration des chlorures dans le distillat. Les paragraphes suivants décrivent brièvement la méthode de mesure de la conductivité et le dosage des chlorures.

III.1.2.1. Mesure de la conductivité

La conductivité électrique explique dans quelle mesure une matière conduit l'électricité. Son unité de mesure est le siemens par mètre. La conductivité dépend de la température, de la pureté de la substance utilisée, notamment. Les liquides et les gaz conduisent aussi l'électricité. Par exemple, la conductivité de l'air à 20 °C est de 10^{-15} S/m et celle de l'eau pure $5,6 \times 10^{-6}$ S/m tandis que celle de l'eau de mer est de 4,8 S/cm.

Pour la mesure de la conductivité, nous avons utilisé un conductimètre de laboratoire. Des échantillons de 10 mL de distillat prélevés chaque heure ont été analysés depuis le commencement de la condensation jusqu'à 19 h. Les résultats sont regroupés dans le Tableau 4.

III.1.2.2. Dosage des chlorures

Le dosage des chlorures a été fait selon le mode opératoire suivant:

- On prélève 5 mL d'échantillon d'eau distillée que l'on verse dans un erlenmeyer auquel on ajoute quelque goutte de l'indicateur chromate de potassium (K_2CrO_4).
- On remplit la burette par une solution de nitrate d'argent $AgNO_3$ jusqu'au zéro.
- Puis on commence le dosage en ajoutant progressivement la solution de nitrate d'argent tout en agitant jusqu'à la formation du précipité de chromate d'argent (coloration rouge orangée persistante)
- On note le volume de nitrate d'argent ajouté pour déduire la concentration des ions de chlorures en solution.

Chapitre IV : Résultats & discussions

IV.1. Évolution de la température à l'intérieur du distillateur

Pour avoir une idée sur l'évolution de la température interne du distillateur, nous avons relevé les valeurs de la température ($T_{\text{fond-solution}} > T_{\text{surf-solution}} > T_{\text{vintérieure}} > T_{\text{vextérieure}} > T_{\text{ambiante}}$) à différents endroits de l'appareil en fonction du temps d'ensoleillement pour une solution de chlorure de sodium à 4 g/L simulant une eau saumâtre. Les résultats obtenus sont illustrés sur la Figure 19. On peut observer que la température augmente en général et atteint un pic vers 14 h correspondant à l'heure de rayonnement maximum puis décline à nouveau en fonction de l'angle incident. La température maximale atteinte est de 52 °C pour le fond du bac du distillateur ($T_{\text{fond-sol}}$). Ce résultat est normal et correspond au plateau peint en noir, considéré comme un corps noir. L'élévation de la température du vitrage intérieur est due à l'absorption du rayonnement solaire incident et de la chaleur cédée par la surface d'évaporation.

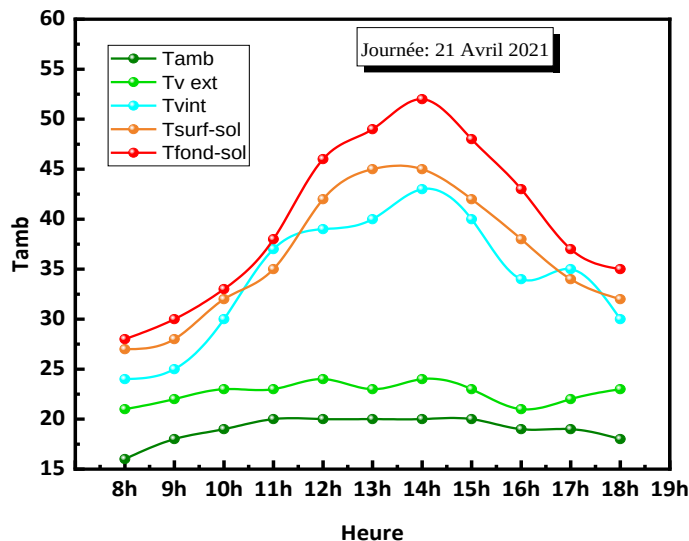


Figure 17: Evolution des températures des différents endroits du distillateur solaire

Ces mesures ont été prises en ouvrant délibérément le distillateur sachant que cela entraînerait des fuites de vapeur pour avoir une idée sur l'évolution relative de la température dans le distillateur.

IV.2. Effet de la dilution de l'eau de mer sur le rendement de l'appareil

Nous avons commencé par travailler avec l'eau de mer et déterminé le rendement de l'appareil en prenant en compte les paramètres météorologiques d'intérêt (Température externe, vitesse du vent, couverture nuageuse, etc.)

Les résultats sont exprimés en mL/h.m² (millilitres par mètre carré par heure). Le Tableau 2 regroupe les résultats obtenus pour l'eau de mer et l'eau de mer diluée. Le tableau suivant rassemble les valeurs pour l'eau de mer et les solutions d'eau de mer à 30, 25 et 20 g/L.

Tableau 2:Rendment du distillateur pour l'eau de mer et l'eau de mer diluée

Heure	Eau de mer (35g/L)		Eau de mer diluée 1.16 fois (30g/L)		Eau de mer diluée 1.4 fois (25g/L)		Eau de mer diluée 1.75 fois (20g/L)	
	Rendement horaire (mL/h.m ²)	Volume de distillat (mL/m ²)	Rendement horaire (mL/h.m ²)	Volume de distillat (mL/m ²)	Rendement horaire (mL/h.m ²)	Volume de distillat (mL/m ²)	Rendement horaire (mL/h.m ²)	Volume de distillat (mL/m ²)
8 h	0	0	0	0	0	0		
9h	0	0	0	0	0	0		
10h	0	0	0	0	0	0		
11h	0	0	0	0	0	0	0	0
12h	0	0	6,09	24,39	3,65	14,63	0	0
13h	0,97	4,87	24,39	121,95	39,02	195,12	4,878	24,39
14h	2,35	14,14	27,64	165,85	65,04	390,24	44,71	268,29
15h	8,71	60,97	31,35	219,51	76,65	536,58	62,71	439,02
16h	15,24	121,95	33,53	268,29	85,36	682,92	70,12	560,97
17h	16,26	146,34	32,52	292,68	86,72	780,48	67,75	609,75
18h	18,53	185,36	31,70	317,07	80,48	804,87	65,85	658,53
19h	19,51	214,63	33,25	365,85	75,38	829,26	62,08	682,92

Il ressort de l'analyse des résultats que le rendement du distillateur augmente avec le taux de dilution passant de 19,51 mL/h/m² pour l'eau de mer initiale à 62,08 mL/h/m² pour une eau de mer diluée 1,75 fois.

Ce résultat montre que la dilution de l'eau de mer est bénéfique pour la production globale d'eau distillée par cet appareil. La dilution permet aux ions solvatés d'être plus libres et augmente la concentration de l'eau facilitant son évaporation par rapport à l'eau de mer.

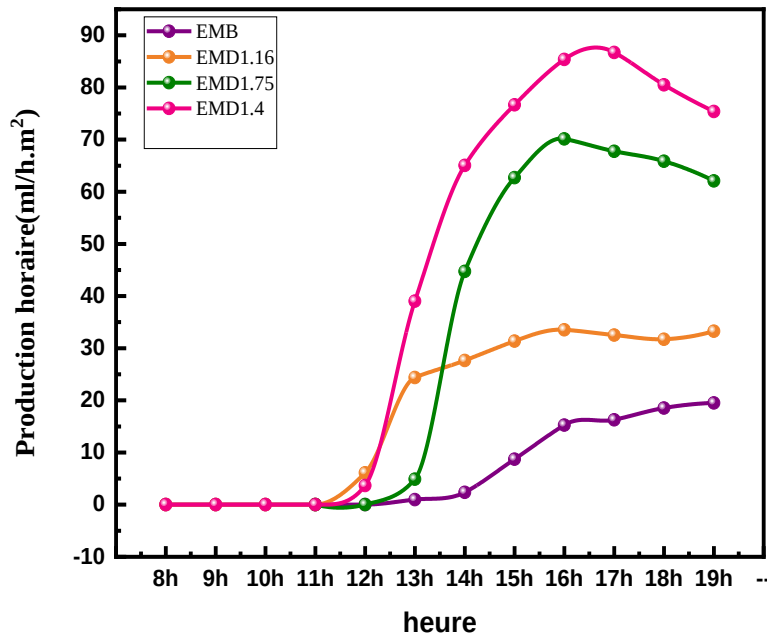


Figure 18 : Production d'eau distillée à partir de l'eau de mer (EMB) et l'eau de mer diluée à divers taux

La Figure 18 illustre l'évolution du rendement (production) horaire. L'expérience a été faite pendant une période de 5 jours (du 29 mai jusqu'à 6 juin). La figure montre que le rendement est le plus élevé pour l'eau de mer diluée 1,4 fois (EMD 1.4) par rapport aux autres, surtout l'eau de mer initiale (EMB).

IV.3. Effet des paramètres météorologiques sur le volume et la production horaire du distillat

Le tableau suivant regroupe les valeurs obtenues des paramètres météorologiques, en l'occurrence, la couverture nuageuse (Cnuage), la température de la vitre extérieure (Tvit ex), la vitesse du vent (V-vent).

Tableau 3: Valeurs relevées des conditions météorologiques pour les solutions diluées

heure	Eau de mer (35g/L)			Eau de mer diluée 1.16 fois (30g/L)			Eau de mer diluée 1.4 fois (25g/L)			Eau de mer diluée 1.75 fois (20g/L)		
	Cnuage (%)	Tvit-ex (°C)	V-vent (km/h)	Cnuage (%)	Tvit-ex (°C)	V-vent (km/h)	Cnuage (%)	Tvit-ex (°C)	V-vent (km/h)	Cnuage (%)	Tvit-ex (°C)	V-vent (km/h)
8h	89	23	7	85	21	6	39	22	8			
9h	79	25	8	69	25	5	32	25	9			
10h	77	26	9	93	27	5	32	27	10			
11h	83	28	13	95	29	6	29	29	12	32	28	7
12h	80	29	19	95	30	9	29	31	14	21	32	10
13h	71	30	19	56	32	14	30	31	17	33	33	12
14h	89	30	21	80	35	15	20	37	18	52	38	15
15h	80	31	23	51	34	16	21	36	19	43	36	17
16h	83	32	23	54	37	17	18	36	19	29	38	21
17h	80	28	21	90	33	17	16	36	20	29	38	20
18h	75	29	19	79	33	18	14	32	20	26	34	18
19h	77	29	18	79	31	19	1	32	17	34	33	13

La température relevée de la vitre extérieure varie de 23 à 29°C pour l'eau de mer, de 21 à 31°C pour l'eau de mer diluée et de 28 à 34 °C. Ce domaine de variation n'est pas très élevée, par contre la couverture nuageuse était importante lors de l'expérience avec l'eau de mer brute (initiale) par rapport

aux solutions diluées. Ceci peut donc influencer beaucoup sur le rendement du distillateur. Les Figures 19 et 20 illustrent bien ces écarts.

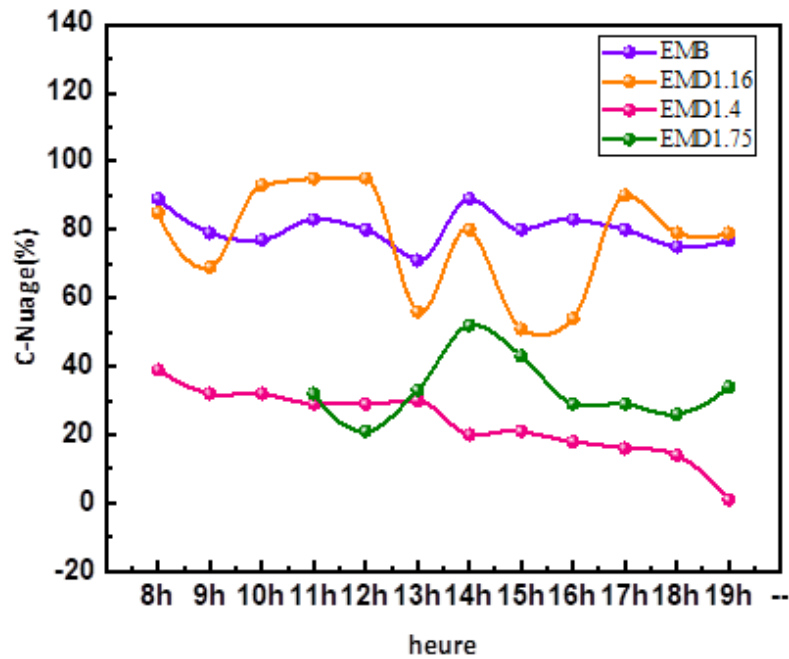


Figure 19 : Couverture nuageuse relevée lors de la distillation solaire des diverses solutions d'eau de

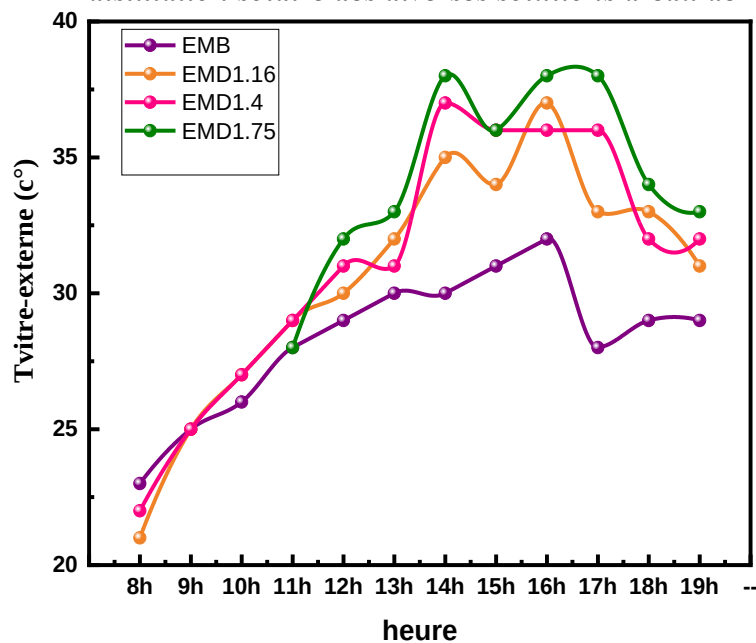


Figure 20 : Température extérieure relevée lors de la distillation solaire des diverses solutions d'eau

IV. 4. Qualité de l'eau distillée obtenue

Afin de suivre la qualité de l'eau obtenue par le biais du distillateur solaire étudié, nous avons procédé à l'évaluation de sa qualité en mesurant sa conductivité électrique. Le tableau 4 en résume les valeurs.

Tableau 4: Valeurs mesurées de la conductivité électrique et des chlorures de l'eau distillée

Heure	Eau de mer (35 g/L)		Eau de mer diluée 1.16 fois (30g/L)		Eau de mer diluée 1.4 fois (25g/L)		Eau de mer diluée 1.75 fois (20g/L)	
	Xd (mS/cm)	[Cl ⁻] (g/l)	Xd (mS/cm)	[Cl ⁻] (g/l)	Xd (mS/cm)	[Cl ⁻] (g/l)	Xd (mS/cm)	[Cl ⁻] (g/l)
8h								
9h								
10h								
11h								
12h								
13h			0,151	0.014	0,191	0.085		
14h			0,122	0.028	0,125	0.028	0,085	0.049
15h	6,8	1.764	0,135	0.049	0,103	0.028	0,72	0.028
16h	4,59	1.064	0,117	0.035	0,124	0.021	0,571	0.014
17h	3,03	0.709	0,112	0.071	0,105	0.035	0,06	0.014
18h	2,28	0.709	0,117	0.056	0,096	0.021	0,0628	0.042
19h	1,72	0.354	0,103	0.049	0,101	0.042	0,0658	0.021

A la lecture des résultats, il ressort que les valeurs de la conductivité sont assez basses, preuve d'une minéralisation faible pour l'eau de mer diluée 1,75 fois. Pour l'eau de mer brute, elle est assez importante. Ces résultats montrent l'effet bénéfique de la dilution sur la qualité de l'eau distillée par cet appareil. La concentration des chlorures suit le même cours et est très faible. Dans l'ensemble, l'eau obtenue est de bonne qualité.

A titre d'illustration de l'influence des conditions météorologiques sur le rendement du distillateur étudié, nous avons suivi la production d'eau distillée à partir d'une solution d'eau de mer identique (diluée 1, 75 fois) pour les deux journées du 31 Mai 2021 et du 02 Juin 2021 où les couvertures nuageuses et les températures externes des vitres étaient différentes (Voir Tableau 5).

Tableau 5: Rendement du distillateur en fonction des conditions météo

heure	Journée du 31 Mai 2021				Journée du 2 Juin 2021			
	Rendement horaire (mL/h.m ²)	Cnuage (%)	Tvit-ex (°C)	V-vent (km/h)	Rendement horaire (mL/h.m ²)	Cnuage (%)	Tvit-ex (°C)	V-vent (km/h)
8h	0	81	24	8				
9h	0	85	28	8				
10h	0	86	30	6				
11h	0	100	29	10	0	32	28	7
12h	0	75	28	13	0	21	32	10
13h	0	79	34	19	4,878	33	33	12
14h	3,25	97	32	19	44,71	52	38	15
15h	12,19	98	27	20	62,71	43	36	17
16h	12,19	100	27	21	70,12	29	38	21
17h	13,55	100	32	19	67,75	29	38	20
18h	13,41	95	31	19	65,85	26	34	18
19h	17,73	95	24	16	62,08	34	33	13

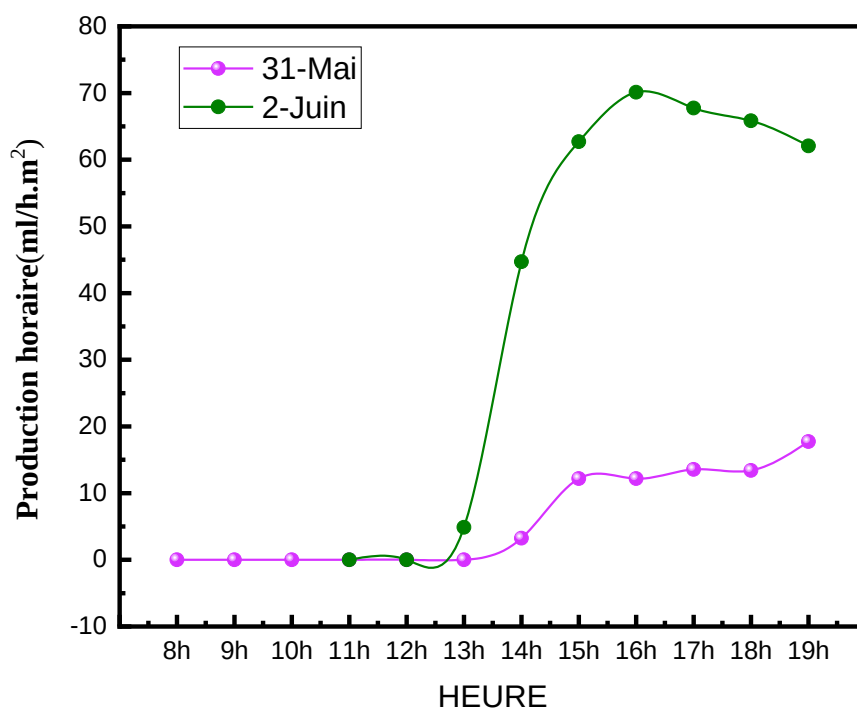


Figure 21 : Rendement horaire du distillateur pour deux journées de conditions météo différentes (eau de mer diluée 1.75 fois)

On peut constater que le rendement à 15 h passe de 12,19 mL/h.m² pour la journée du 31 mai où la couverture nuageuse était de l'ordre de 98 % et la température de 27 °C à 62,71 mL/h.m² avec une couverture nuageuse de 43 % et une température de 36 °C à la même heure. Soit une augmentation de 414 %. On peut conclure que les conditions météorologiques influent considérablement sur le rendement du distillateur solaire.

IV.5. Effet de la surface de l'absorbeur

Nous avons augmenté la superficie de la surface absorbante de 0,41 m² jusqu'à 0,58 m² en ajoutant des baguettes en bois parallélépipédiques de surface connue. Les principaux résultats sont regroupés sur le Tableau 6.

Tableau 6: Rendement horaire en distillat (ml/h.m²) pour l'eau de mer et ses solutions diluées pour deux surfaces absorbées différentes

Heure	Eau de mer (35g/L)		Eau de mer diluée 1.16 fois (30g/L)		Eau de mer diluée 1.4 fois (25g/L)		Eau de mer diluée 1.75 fois (20g/L)	
	0.41 m ²	0.58 m ²	0.41 m ²	0.58 m ²	0.41 m ²	0.58 m ²	0.41 m ²	0.58 m ²
8h	0	0	0	0	0	0		0
9h	0	0	0	0	0	0		0
10h	0	0	0	0	0	0		0
11h	0	0	0	2.298	0	2.298	0	0
12h	0	2.586	6,09	25.862	3,65	17.241	0	3.448
13h	0,97	20.689	24,39	41.379	39,02	31.034	4,878	27.586
14h	2,35	37.356	27,64	60.344	65,04	40.229	44,71	43.103
15h	8,71	46.798	31,35	71.428	76,65	46.798	62,71	51.724
16h	15,24	49.568	33,53	71.120	85,36	49.568	70,12	53.879
17h	16,26	45.977	32,52	70.881	86,72	48.808	67,75	53.639
18h	18,53	44.827	31,70	68.965	80,48	48.275	65,85	53.448
19h	19,51	42.319	33,25	64.263	75,38	48.589	62,08	53.291

Une analyse des résultats regroupés sur le Tableau 6 montre que plus la surface est importante plus la quantité d'eau recueillie est importante pour des conditions météorologiques similaires pour les solutions étudiées. En effet, le rendement à 15 h par exemple passe de 8,71 (mL/h.m²) à 46.798 (mL/h.m²) pour l'eau de mer. Nous pouvons dire que le rendement dépend étroitement de la surface absorbante étant donné qu'une énergie plus conséquente est transmise à l'eau à distiller. Il est en de même pour les solutions d'eau de mer.

Conclusion

Cette étude nous a permis d'appliquer nos connaissances en génie des procédés en pratique où nous avons expérimenté un distillateur solaire conçu et réalisé à l'université de Mostaganem. Le but de ce travail est d'utiliser une énergie propre et durable sans dégagement de gaz à effet de serre pour produire de l'eau distillée à partir de l'eau de mer. Des échantillons de l'eau de mer ont été recueillis au niveau du littoral de Mostaganem. Les paramètres influençant le rendement horaire étudiés sont le taux de dilution de l'eau de mer, les conditions météorologiques et la surface de l'absorbeur. Il ressort de cette étude par exemple que le rendement du distillateur (de surface absorbante égale à 0.41 m^2) augmente avec le taux de dilution passant de $19,51 \text{ mL/h/m}^2$ pour l'eau de mer initiale à $62,08 \text{ mL/h/m}^2$ pour une eau de mer diluée 1,75 fois. L'influence des conditions météorologiques est primordiale. A titre d'exemple, le rendement à 15 h passe de $12,19 \text{ mL/h.m}^2$ pour la journée du 31 mai où la couverture nuageuse était de l'ordre de 98 % et la température de 27°C à $62,71 \text{ mL/h.m}^2$ avec une couverture nuageuse de 43 % et une température de 36°C à la même heure, soit une augmentation de 414 %. On peut conclure que les conditions météorologiques influent considérablement sur le rendement du distillateur solaire. L'augmentation de la surface absorbante a vu le rendement horaire du distillateur nettement amélioré.

Ce travail a montré qu'on peut efficacement exploiter l'énergie solaire thermique pour produire de l'eau distillée qui peut être utilisée dans beaucoup de domaines.

Références

- [1] Guimard, L., Étude du comportement et modélisation d'une installation de dessalement d'eau de mer par distillation soumise à des régimes transitoires., Université de Lyon. 2019
- [2] Souak, F.z.j.r.d.e.e.d.s.a., la politique de l'eau en Algérie: valorisation et développement durable. 5(2): p. 96-114. 2008.
- [3] Hadj Belkacemi Mohammed, « Modélisation et Etude Expérimentation d'un capteur solaire non Vitré et Perforé », (mémoire de master en énergétique et Matériaux) , Université Abou BakrBelkaïd , Tlemcen, Algérie, le 6 juillet 2011.
- [4] Sayeh, M E H O U Dj, Infrastructure Qualité dans le secteur de l'énergie solaire thermique. 2020.
- [5] Benchati Toufik, « Utilisation du solaire thermique passif pour le confort thermique par traitement de l'air pour différentes saisons », Thèse de Doctorat, Université AMAR TELIDJI, Laghouat. 2015.
- [6] <https://docplayer.fr/5167469-Said-noureddine-cder-nsaid-cder-dz.html>
- [7] Birkett, J.D., The History of Desalination Before Large-Scale Use. Desalination and Water Resources-History, Development and Management of Water Resources 1, 381–434. 2012.
- [8] Bandelier, P., Pelascini, F., d' Hurlaborde, J.-J., Maise, A., Boillot, B., Laugier, J.,. MED seawater desalination using a low-grade solar heat source. Desalination and Water Treatment 57, 23074–23084. <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1148220>. 2016
- [9] Loeb, S., The Loeb-Sourirajan Membrane: How It Came About, in: Turbak, A.F. (Ed.), Synthetic Membranes: American Chemical Society, Washington, D. C., pp. 1– 9. 1981.
- [10] Pastor, J., Pauli, A.-M., Dialyse. Techniques de l'ingénieur. Analyse et caractérisation 2, p1525–1. 1995.
- [11] Bechki, D. Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes (Doctoral dissertation, Université de Batna 2). 2011.
- [12] A. Mouchot, La chaleur solaire et ses applications industrielles, Paris : Gauthier-Villars pp 233-238 .1879.
- [13] Daniel Farrington, Direct use of the sun's energy, Yale University Press, New Haven, 374 pages, (Chapter 10, Distillation of water, pp 167-195). 1964.
- [14] S. Kalogiro, Seawater desalination using renewable energy sources, Progress in Energyand Combustion Science 31 pp 242-28. 2005.
- [15] Maria Telkes, Solar distiller for life rafts, US Office of Science, Report N°525, PB21120, June 1945.
- [16] C. Gomella, Contribution à l'étude de la distillation solaire les résultats industriels acquis en Algérie aperçu sur l'importance de l'énergie thermique, Colloques internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique, France.1961.

- [17] M.A.S. Malik, N .Tiwari, A. Kumar, M.S. Sodha, Active and passive solar distillation: a review, Solar distillation, UK: Pergamon Press; 1982
- [18] G.N. Tiwari, A. Minocha, P.B Sharma and M.E. Khan; Simulation of convective mass transfer in a solar distillation process. Energy. Conv. Mgnt. Vol 38. pp 761 -770. 1997.
- [19] A. Chaker, G. Menguy, Efficacité interne d'un distillateur solaire sphérique, Rev Energ Ren. Numéro special 10ème Journée International de Thermique 53–5853. 2001.
- [20] HALLOUFI OUAHID, « etude de la performance d'un distillateur solaire par un système de préchauffage solaire de l'eau saumâtre », (mémoire de magister en génie climatique), université mentouri constantine, 2010.
- [21] BENARIM Azineelabdine, « Amélioration de la capacité de l'absorbeur d'un distillateur solaire simple par l'ajout d'une Couche de sable », (mémoire de master en génie des procédés), université kasdi merbah ouargla, 16/06/2012.
- [22] M. Boukar, A. Harmim, Design parameters and preliminary experimental investigation of an indirect vertical solar still, Desalination. 203 (2007) 444–454. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.026>.