

N° Série :/2022

Université Kasdi Merbah Ouargla



Faculté des Hydrocarbures, Energies Renouvelables et Science de la Terre et de l'Univers

Département Des Energies Renouvelables

MÉMOIRE

Pour obtenir le Diplôme de Master

Option : Energie Renouvelable En Mécanique

Présenté Par :

CHAUCHE Noumane, DJOUHRI Abdelkader, FROUHAT Hamza

-THEME-

**DIMENSIONNEMENT D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE POUR ALIMENTER UN
ELECTROLYSEUR DE PRODUCTION D'HYDROGENE VERT**

Soutenu le : 14 / 06 / 2022 devant la commission d'examen

Jury :

Président :	MM. ZOUBEIDI Chahinaz	Docteur	Univ. Ouargla
Rapporteur :	Mr. BERBEUH Med Hafed	Docteur	Univ. Ouargla
Examineur :	Mr. AMMARI Chouaib	Docteur	Univ. Ouargla

Remerciement

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur pour nous avoir la force pour accomplir ce travail.

Nous adressons nos vifs remerciements à Mr M.BEREUH, notre promoteur qui nous a orientés durant l'élaboration de ce travail.

Nous présentons nos chaleureux remerciements aux enseignants de notre faculté du département d'Energie renouvelable et mécanique et de la faculté de science de la matière pour leurs aides et orientations durant notre formation ; Mr. SOUDANI ET Mr. M.BELHADJ.

Je remercie beaucoup Mm S.ZEROUAL qui nous a aidé à compléter ce travail.

Nos derniers remerciements, vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Quoi que de plus que de pouvoir partager les meilleurs moments de sa vie avec les êtres qu'on aime.

Arrivé au terme de mes études, j'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

- ❖ Notre chers parents*
- ❖ Notre chers sœurs*
- ❖ Notre chers frères*
- ❖ Toute notre grandes familles*
- ❖ Tous nos amis chacun a son nom*
- ❖ Tous les camarades du notre promotion.*
- ❖ Tous ceux que nous m'aime*

CHAOUCHE Noumane, DJOUHRI Abdelkader, FROUHAT Hamza

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Sommaire

Liste Des Tableaux

Liste Des Figures

Introduction Générale

Chapitre I : Notions générales sur l'hydrogène vert

I.1.Introduction	5
I.2.Généralité sur l'hydrogène	5
I.2.1. Définition de l'hydrogène	5
I.2.2 Propriétés physico-chimiques	5
I.2.3 Les couleurs de l'hydrogène	7
I.2.4 Utilisations industrielles de l'hydrogène	8
I.2.4.1 Industrie électronique	8
I.2.4.2 Hydrogène carburant	8
I.2.4.3 Industries chimiques	9
I.2.5 Les différentes formes de stockage de l'hydrogène	9
I.2.5.1 Le stockage sous pression	10
I.2.5.2 Le Stockage sous forme liquide	10
I.2.5.3 Le stockage sous forme solide	11
I.2.6 Avantages et inconvénients de l'hydrogène	12
I.2.6.1 Les avantage	12
I.2.6.2 Les inconvénients	12
I.2.7 Considération de production d'hydrogène	12
I.2.8 Les procédés de production d'hydrogène	13
I.2.8.1 Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures	13
I.2.8.2 Produit de l'hydrogène à partir la gazéification	13
I.2.8.3 Produit de l'hydrogène à partir d'algues vertes et bactéries (biologique)	14
I.2.8.4 Produit de l'hydrogène à partir l'énergie nucléaire	14
I.3. Aperçu L'hydrogène vert	15
I.3.1 Définition de l'hydrogène vert	15
I.3.2 Les techniques de production de l'hydrogène vert	15

I.3.2.1 Le craquage de l'eau	15
I.3.2.2 Processus de production d'hydrogène par la biomasse	16
I.3.2.3 Processus de production d'hydrogène par la technologie de plasma	19
I.3.3 Estimation des coûts de production de l'hydrogène vert	20
I.3.4 les limites des technologies de production de l'hydrogène vert	21
I.4. Conclusion	21

Chapitre II : Notions de bases sur les électrolyseurs et les distillateurs solaires

II.1. Introduction	23
II.2. L'électrolyseur	23
II.2.1. Principe général sur l'électrolyseur	23
II.2.2. Fonctionnement d'un électrolyseur	23
II.2.3. Alimentations d'un électrolyseur	23
II.2.4. Les Différents types d'électrolyseur	24
II.2.4.1. Electrolyseur alcalin	24
II.2.4.2. Électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM)	25
II.2.4.3. Electrolyseur à haute température	26
II.3. Les distillateurs solaires	26
II.3.1. Introduction	26
II.3.2. Notions de bases	27
II.3.2.1. Le soleil	27
II.3.2.2. La terre	27
II.3.2.3. Relation soleil-terre	27
II.3.2.4. Rayonnement solaire	28
II.3.2.5. Irradiation	28
II.3.2.6. Effet de serre	29
II.3.3 Différents types de distillateurs	30
II.3.3.1. Distillation solaire à effet de serre	30
II.3.3.2. Distillateur à simple effet	31
II.3.3.3. Distillateur solaire à double pente	31
II.3.3.4. Distillateur sphérique à balayage	32
II.3.3.5. Distillateur solaire vertical	32
II.3.3.6. Distillateur solaire incliné à cascades	33
II.3.3.7. Distillateur à étages multiples	34

II.3.4. L'opération de distillation solaire	35
II.3.4.1. Paramètres influents	35
II.3.4.1.1. Paramètres géométriques	35
II.3.4.1.2. Paramètres météorologiques	36
II.3.4.2. Caractéristiques et performances du distillateur	37
II.4. Conclusion	39

Chapitre III : Présentation de quelques applications sur l'efficacité et de dimensionnement des distillateurs solaires à travers la littérature

III.1. Introduction.....	41
III.2. Étude paramétrique théorique et expérimentale d'un distillateur solaire étagé modifié .	41
III.2.1. Objectif	41
III.2.2. Matériels et méthodes	41
III.2.3. Méthodologie de ce travail	42
III.2.4. Modèle théorique	44
III.2.5. Résultats et discussion	44
III.2.6. Conclusion	46
III.3. Modélisation et analyse des performances d'une unité de dessalement solaire avec refroidissement par double vitrage	47
III.3.1. Objectifs recherche par le chercheur dans ce travail	47
III.3.2. Matériels et méthodes	47
III.3.3. Résultats et discussion	48
III.3.4. Conclusion	51

Chapitre IV : Etude expérimentale sur le dimensionnement d'un distillateur solaire

IV.1. Introduction	53
IV.2. Matériels et méthodes	53
IV.2.1. Présentation de la région d'étude "Ouargla"	53
IV.2.2. Matériel et équipements utilisés dans les expériences de distillation	54
IV.2.2.1. Un distillateur simple à pente unique	54
IV.2.2.2. Les tuyaux	54
IV.2.2.3. Une Bouteille de récupération du distillat	54
IV.2.3. Les Instruments de mesure utilisés dans l'expérience	55
IV.2.3.1. Instrument de Mesure de la température (thermocouples)	55
IV.2.3.2. Instrument de mesure du rayonnement solaire global : (polarimètre).....	56

IV.2.3.3. Appareil de mesure de la température ambiante	56
IV.2.3.4. Éprouvette Graduée	56
IV.2.4. Méthodologie de travail	57
IV.2.4.1. Le protocole expérimental	57
IV.2.4.2. Les grandeurs mesurées pendant l'expérience	58
IV.2.4.3. L'emplacement des thermocouples	58
IV.2.4.4. Quelques contraintes rencontrées sur le terrain	59
IV.3. Résultats et discussion	60
IV.3.1. Présentation des résultats obtenus expérimentalement	60
IV.3.1.1. La variation du rayonnement solaire et la température ambiante en fonction du temps	60
IV.3.1.2. La variation de différentes températures en fonction du temps	61
IV.3.1.3. Variations de la quantité d'eau distillée en fonction du temps	62
IV.3.1.4. Comparaison des débits moyens au cours des jours de l'expérience	66
IV.3.2. Exploitation et discussions des résultats	66
IV.3.2.1. Les Résultats	66

Conclusion général

Liste des tableaux

Tableau I.1 : les propriétés de l'hydrogène moléculaire H ₂ .	6
Tableau I.2 : les méthodes de la production d'hydrogène	14
Tableau I.3 : estimations des coûts des différentes techniques de production d'hydrogène.	20
Tableau IV.1 : Quelques contraintes rencontrés sur le terrain.	59

Liste des figures

Figure I.1 : Illustration des différents couleurs d'hydrogène.	8
Figure I.2 : Diagramme de phases de l'hydrogène.	10
Figure II.1 :Principe de l'électrolyse alcaline.	25
Figure II.2 :Schéma de l'électrolyse PEM.	25
Figure II.3 :Principe d'une électrolyse à haute température.	26
Figure II.4 :Mouvement de la terre autour du soleil.	28
Figure II.5 : Carte solaire de l'Algérie.	29
Figure II.6 : Effet de serre.	29
Figure II.7 :Distillation solaire et ses composants.	30
Figure II.8 :Distillateur à simple effet avec un seul capteur.	31
Figure II.9 :Distillateur solaire à simple effet avec deux capteurs.	31
Figure II.10 : Distillateur solaire sphérique à balayage.	32
Figure II.11 : distillateur solaire vertical.	33
Figure II.12 : Distillateur solaire incliné à cascades.	33
Figure II.13 :Distillateur à étages multiples.	35
Figure III.1 :Une photo présente le montage expérimental.	42
Figure III.2 :Diagramme schématique de l'installation expérimentale.	43
Figure III.3 :Variation horaire de température et le rayonnement solaire pour le capteur étagé et conventionnel	44
Figure III.4 :Différence de productivité avec différentes températures d'eau d'alimentation T_{fw} à $W = 120$ mm et différentes profondeurs d'eau	44
Figure III.5 : Effet de l'augmentation de la largeur du plateau sur la différence de productivité	45
Figure III.6 :La variation cumulée de l'eau douce pour le gradué et le conventionnel	45
Figure III.7 :Différence de productivité avec différentes profondeurs d'eau et la même largeur de plateau et $H_b = 10$ mm.	45
Figure III.8 :Variation quotidienne de l'efficacité pour le distillateur à différentes largeurs et profondeurs de plateau.	45
Figure III.9 :Variation d'efficacité horaire pour les distillateurs conventionnels	46
Figure III.10 : Schémas du distillateur solaire à double verre.	48
Figure III.11 : la variation de la température des différents composants du distillateur	49
Figure III.12 :Total solaire flux on a horizontal surface for Muscat, Oman	49
Figure III.13 : Productivité cumulée des distillateurs pour le mois de mars	49
Figure III.14 :la variation de la température des différents composants du distillateur en juin	50
Figure III.15 :Productivité cumulée des distillateurs pour le mois de juin	50
Figure IV.1 :les Instruments de Mesure de la température (thermocouples)	55
Figure IV.2 : le Solarimètre	56

Figure IV.3: l'interface de l'application "timeanddate" utilisé dans notre étude.	56
Figure IV.4: Eprouvette de mesure de la quantité d'eau distillée.	57
Figure IV.5: Refroidissement manuel du vitrage.	58
Figure IV.6: L'emplacement des thermocouples.	59
Figure IV.7: Courbe de l'intensité solaire et la température ambiante de la journée 15-05-2022.	60
Figure IV.8: Courbe de l'intensité solaire et la température ambiante de la journée 16-05-2022.	61
Figure IV.9: L'évolution des températures en fonction du temps de la journée 15-05-2022	61
Figure IV.10: L'évolution des températures en fonction du temps de la journée 16-05-2022	62
Figure IV.11: L'évolution des températures en fonction du temps de la journée 17-05-2022	62
Figure IV.12: Volume d'eau distillé produit en fonction du temps	63
Figure IV.13: Cumul horaire	63
Figure IV.14: Volume d'eau distillé produit en fonction du temps	64
Figure IV.15: Cumul horaire	64
Figure IV.16 : Volume d'eau distillé produit en fonction du temps	65
Figure IV.17: Cumul Horaire	65
Figure IV.18: Débits moyens et température en fonction du temps.	66

Introduction générale

Introduction générale

L'intérêt de l'épuisement des sources d'énergie fossiles (pétrole, gaz et carbone) et le problème de l'effet de serre et des réchauffements climatiques et les conséquences qu'il provoque et qui menacent l'existence humaine, ces derniers sont parmi les préoccupations les plus importantes de tous ceux qui s'intéressent au monde de l'énergie, de l'environnement et développement durable dans le monde entier. L'électrification de l'ensemble du système énergétique à l'aide de différents types d'énergies renouvelables propres est une solution, mais actuellement l'électrification de l'ensemble de ce système sera difficile, ou du moins plus coûteuse que la combinaison de la production d'énergie renouvelable et de carburants à faible émission de carbone, et l'hydrogène vert est l'une des carburants bas carbone susceptibles de remplacer aujourd'hui les carburants fossiles.

L'hydrogène est un combustible peut être transporté par pipelines ou stocké dans des réservoirs pour être acheminé vers des points de consommation (automobile, industrie, etc.) et restituer sa valeur énergétique. L'hydrogène est également utilisé dans les perspectives prometteuses des piles à combustible et des moteurs thermiques à hydrogène.

Pour ces raisons, aujourd'hui de nombreux pays du monde travaillent dur, surtout les pays développés, sur le développement de l'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie, notamment l'hydrogène vert, qui est produit à partir de l'électrolyse de l'eau et qui utilise une énergie renouvelable pour alimenter l'électrolyseur.

L'hydrogène n'existe pas à l'état naturel [1]. Actuellement, sa production est essentiellement effectuée par reformage catalytique d'hydrocarbures (principalement gaz naturel), mais dans le cas où une très grande pureté d'hydrogène est souhaitée, la production d'hydrogène est effectuée par électrolyse de l'eau.

L'eau qui est utilisée dans le processus d'électrolyse pour obtenir de l'hydrogène gazeux doit être de l'eau distillée. Cette dernière est obtenue par le processus de distillation de l'eau naturelle qu'il soit à engrenages ou salin, ce processus qui se déroule dans les distillateurs, nécessite une source d'énergie, généralement fossile (impacts économiques et environnementales).

Pour le but de minimiser le coût et réduire les émissions de dioxyde de carbone, Notre contribution scientifique intitulée : **Dimensionnement d'un distillateur solaire pour alimenter un électrolyseur de production d'hydrogène vert**, qui nous avons présenté dans ce manuscrit est logiquement enchaîné dans une introduction, quatre chapitres et une

conclusion. Dans le premier chapitre on trouve des notions générales et quelques aspects théoriques, en fournissant des informations de base sur L'hydrogène et notamment l'hydrogène vert, alors que le deuxième chapitre théorique, nous aborderons les électrolyseurs et les distillateurs solaires.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté une étude bibliographique analytique de quelques distillateurs solaires en termes d'efficacité et de dimensionnement.

La présentation des matériels, des méthodistes de réalisation d'une étude expérimentales, les résultats des essais effectuées et leurs interprétations, sont présentés dans le quatrième chapitre.

Enfin, nous conclurons notre étude par un résumé, dans lequel nous nous référons aux résultats les plus importants que nous obtiendrons dans cette étude, suivi d'un certain nombre de recommandations potentiellement utiles que nous pouvons tirer.

Chapitre I : Notions générales sur l'hydrogène vert

I.1. Introduction

Des efforts sont déployés dans le monde entier pour réduire les émissions des gaz à effet de serre dans le but de limiter le réchauffement climatique. Ce défi de la limitation des émissions de carbone a nécessité des sources d'énergie alternatives pour remplacer les sources de carbone actuellement nécessaires à la production d'électricité et au transport.

Le développement d'une économie de l'hydrogène avec l'utilisation de l'hydrogène comme substitut potentiel aux combustibles fossiles, pourrait être l'une des solutions prometteuses pour remplacer l'économie actuelle dépendante du carbone. L'hydrogène n'est pas en soi une source d'énergie primaire, mais un vecteur énergétique qui offre partiellement les avantages des combustibles fossiles avec une faible empreinte carbone, elle peut stocker de l'énergie et la redistribuer en énergie utilisable. L'hydrogène peut être ainsi converti en électricité et en chaleur ou en force motrice. [2] Elle offre également un moyen d'intégrer dans le système énergétique des parts élevées d'électricité renouvelable intermittente. L'hydrogène peut être produit à partir de diverses sources et peut être stocké de nombreuses manières, en fonction de son accessibilité et de sa facilité de distribution. [3]

I.2. Généralité sur l'hydrogène

I.2.1. Définition de l'hydrogène

Appelée communément « hydrogène », la molécule de dihydrogène, H_2 , est composée de deux atomes d'hydrogène. L'hydrogène représente 90% des atomes ce qui équivaut à 75% de la masse de l'Univers. Par contre, sur la terre on le retrouve surtout dans les molécules organiques et dans l'eau. La croûte terrestre renferme seulement 0.14 % d'atomes d'hydrogène. La même pour l'atmosphère terrestre où cet élément sous forme de dihydrogène, constitue en volume 0.55ppm des gaz atmosphériques. [4]

I.2.2. Propriétés physico-chimiques

L'hydrogène étant formé d'un proton et d'un électron, il est le premier élément dans le tableau périodique. L'hydrogène H, se combine avec lui-même pour former la molécule la plus simple : H_2 -L'énergie chimique stockée dans les liaisons covalentes peut être transformée en chaleur ou en énergie électrique.

L'hydrogène présente certaines caractéristiques physico-chimiques avantageuses d'un point de vue énergétique (tableau I.1). C'est un gaz incolore, non toxique, inodore, insipide et très léger

(masse volumique = 0,09 kg/m³, à 0°C) qui possède un pouvoir calorifique très élevé (33,3 kWh/kg, contre environ 14 kWh/kg pour le méthane).

En raison de son faible poids moléculaire (i.e. 2,016 g/mol), il diffuse rapidement dans le milieu et par conséquent, l'énergie cinétique sera distribuée plus rapidement en comparaison avec d'autres gaz. Ceci explique sa conductivité thermique élevée de 186,9 mW.m⁻¹.K⁻¹.

Les points de fusion et d'ébullition extrêmement bas résultent des faibles forces d'attraction entre les molécules. Lorsqu'il est condensé à son point d'ébullition, l'hydrogène devient un liquide incolore dont le poids est de 1/14 fois celui de l'eau. En raison de sa très basse température, l'hydrogène liquide rend très friable les matériaux qui sont en contact direct avec lui.

L'hydrogène est fondamentalement un agent réducteur ; en considération de ses propriétés chimiques, il est surtout employé dans l'industrie chimique, si on considère l'aspect physiologique, l'hydrogène est non toxique mais asphyxiant en trop grande quantité dans l'air.

Dans la suite, la nomenclature « hydrogène » désignera le dihydrogène H₂ à l'état gazeux (abus de langage communément admis). La solubilité de l'hydrogène dans l'eau augmente en fonction de la température alors que la présence d'électrolytes réduit sa solubilité. Toutefois, H₂ est le gaz le moins soluble dans les solutions aqueuses. D'autre part, H₂ peut être dissous dans des composés solides pour former des hydrures métalliques. [5]

Tableau I.1: les propriétés de l'hydrogène moléculaire H₂.

Poids moléculaire	2,016 g/mol
Longueur de liaison H–H	0,7416 Å
Energie de dissociation de la liaison H–H	435,93 kJ/mol à 25°C
Point Triple	
Température	-259,19°C
Pression	7,2 kPa
Point Critique	
Température	-240°C
Pression	1296,4 kPa
Densité	
Densité en phase solide à P _{atm}	86,71 kg/m ³
Densité en phase liquide à P _{atm}	70,99 kg/m ³
Densité en phase gaz à P _{atm}	0,089 kg/m ³
Transition de phase	
Température d'ébullition à P _{atm}	-252,78°C
Température de fusion à P _{atm}	-259,20°C
Données thermodynamiques	
Enthalpie de fusion	117,15 J/mol
Enthalpie de vaporisation	903,744 J/mol
Chaleur de combustion	-241,82 kJ/mol

I.2.3. Les couleurs de l'hydrogène

Actuellement, 96 % de l'hydrogène est produit à partir de combustibles fossiles par des procédés à forte intensité de carbone, soit par reformage du méthane à la vapeur (SMR) sans captage, utilisation et stockage du carbone (hydrogène gris), soit par gazéification du charbon (hydrogène noir). Les émissions des gaz à effet de serre et le processus de production définissent la couleur de l'hydrogène.

L'hydrogène vert est produit par l'électrolyse de l'eau dans un électrolyseur, alimenté par de l'électricité produite à partir de sources renouvelables telles que l'énergie hydraulique, éolienne ou solaire. À condition que les apports d'électricité proviennent uniquement de sources d'énergie renouvelables (si de l'eau distillée est nécessaire, qu'ils soient alimentés à 100 % par l'énergie solaire et éolienne), les émissions des gaz et effet de serre pendant le processus de production sont égales à zéro.

La production d'hydrogène gris utilise le gaz naturel, tandis que l'hydrogène noir utilise le charbon comme source primaire. Le processus de transformation, appelé reformage du méthane à la vapeur (SMR), utilise l'oxygène de la vapeur d'eau dans une chambre thermique pour séparer le méthane (CH_4) et produire du H_2 . Toutefois, le processus reste très polluant car il génère plus que 9 kg de CO_2 pour chaque kilogramme d'hydrogène produit.

L'hydrogène bleu suit le même processus que l'hydrogène gris, mais le carbone émis lors de la production est capturé par un procédé CCUS (Séquestration du dioxyde de carbone) pour réduire les émissions de CO_2 .

L'hydrogène jaune est obtenu par électrolyse à partir de l'énergie électrique d'origine mixte qui pourrait provenir du nucléaire ou de la valorisation des déchets. Il pourrait également être obtenu par gazéification des déchets.

L'hydrogène turquoise utilise le gaz naturel ou la biomasse comme apport énergétique via la pyrolyse pour produire de l'hydrogène dans un processus endothermique, tandis que le carbone solide est obtenu comme sous-produit. Alors que la pyrolyse de la biomasse est un processus relativement sale d'un point de vue environnemental, le processus de pyrolyse via le gaz naturel peut être intéressant, à condition que l'énergie provienne de sources renouvelables.

L'hydrogène vert, contrairement aux autres couleurs, a un rôle clé à jouer dans la transition énergétique et peut dé-carboniser des secteurs difficiles à atteindre. [6]

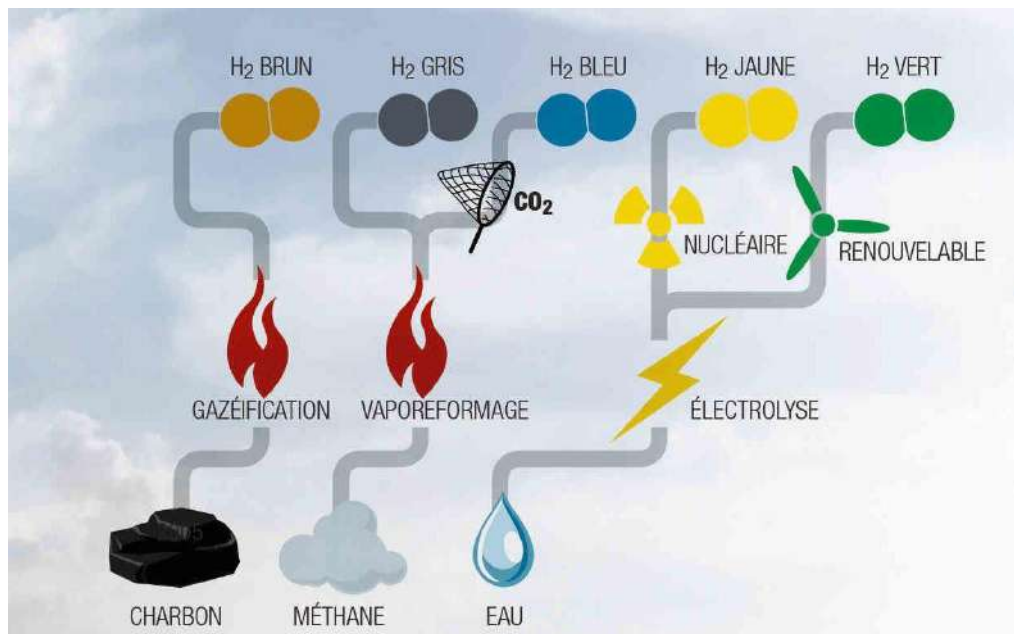


Figure I.1 : Illustration des différents couleurs d'hydrogène. [7]

I.2.4. Utilisations industrielles de l'hydrogène

Il est produit environ 45 millions de tonnes d'hydrogène par an. Il peut être utilisé pour produire différents types d'énergie comme l'énergie thermique qui implique la combustion de l'hydrogène dans une chaudière. L'énergie chimique de l'hydrogène peut également servir à produire de l'énergie électrique grâce à une pile à combustible.

L'électricité et la chaleur sont produites simultanément par recombinaison électrochimique de l'oxygène avec l'hydrogène. Finalement, l'énergie mécanique peut ainsi être produite indirectement, soit par la combustion directe de l'hydrogène dans un moteur thermique ou dans une turbine, soit par l'utilisation de l'électricité produite avec une pile à combustible dans un moteur électrique.

L'hydrogène est couramment utilisé dans un grand nombre de secteurs industriels :

I.2.4.1. Industrie électronique

L'hydrogène est utilisé pour l'élaboration de cristaux de semi-conducteurs de silicium.

I.2.4.2. Hydrogène carburant

La température de flamme très élevée « 2700 degrés » atteinte avec l'oxygène la fait choisir sous forme liquide comme propulseur des fusées et engins spatiaux.

I.2.4.3. Industries chimiques

Les utilisations de l'hydrogène sont très variées dans ce domaine :

- Synthèse de l'ammoniac par réaction avec l'azote pour fabriquer essentiellement des engrais, mais aussi des explosifs, des matières colorantes ;
- Raffinage : hydro sulfuration des fuels pour éliminer le soufre, hydroraffinage pour améliorer les lubrifiants et pour produire des essences spéciales ;
- Synthèse du méthanol par réaction du gaz à l'eau pour la fabrication de caoutchoucs, de résines et de produits de base pour la synthèse chimique comme l'acide acétique, le chlorure de méthyle, les esters ;
- Chimie organique : hydrogénation d'une part d'un certain nombre de matières pour la production de colorants et d'autre part de précurseurs des sulfamides ou des vitamines ;
- Chimie minérale : production d'eau oxygénée. Les utilisations de l'hydrogène dans l'industrie sont donc très diversifiées.

I.2.5. Les différentes formes de stockage de l'hydrogène

Pour une autonomie de 400 km, une voiture équipée d'un moteur thermique a besoin de 24 kg d'essence. Avec une pile à combustible, il ne faudrait plus que 4 kg de dihydrogène. Comme mentionné précédemment, à condition ambiante l'hydrogène possède une masse volumique très faible (0.09 kg/m^3) ce qui implique des volumes de réservoir démesurés. En effet, pour ces 4 kg d'hydrogène, il faudrait un réservoir d'environ 45 m^3 dans les conditions normales de température et de pression. Il est alors intéressant de chercher à augmenter la densité de l'hydrogène afin de le stocker dans des volumes de réservoirs convenables. Le diagramme de phases de l'hydrogène présenté en Figure I.2 permet de se rendre compte des problèmes liés au stockage de ce dernier.

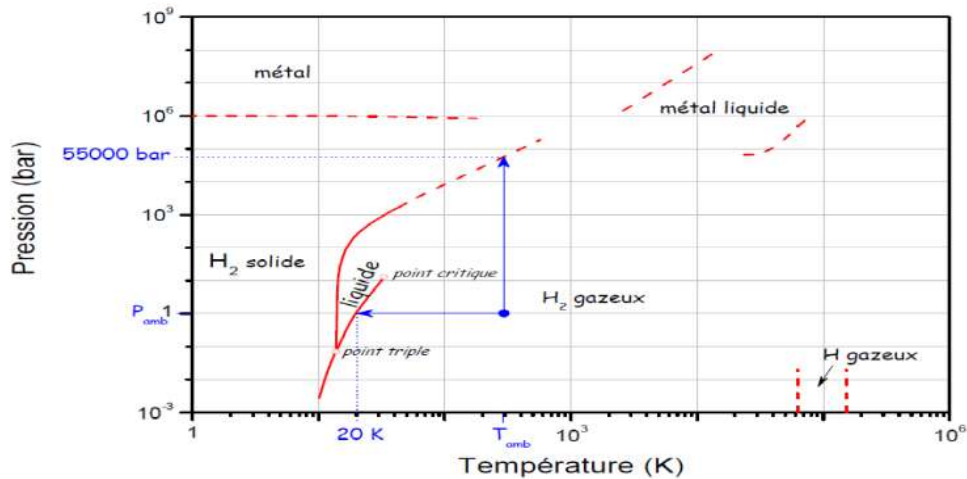


Figure I.2 : Diagramme des phases de l'hydrogène. [4]

I.2.5.1. Le stockage sous pression

La technique de stockage la plus développée à ce jour est la compression de l'hydrogène à haute pression (allant jusqu'à 700 bar). Les bonbonnes utilisées comme réservoirs sont principalement composées de matériaux composites à base de fibre de carbone. Le principal défaut du stockage de l'hydrogène gazeux réside dans sa faible densité volumique énergétique. Ce désavantage vient contre balancer la forte densité massique énergétique que présente l'hydrogène.

I.2.5.2. Le stockage sous forme liquide

Une autre solution de stockage de l'hydrogène est la liquéfaction. Comme le montre le diagramme de phases de l'hydrogène de la figure I.2, le passage de l'état gazeux à l'état liquide nécessite des conditions extrêmes de température (-253 °C sous 1 bar de pression). L'avantage de l'hydrogène sous forme liquide est qu'il présente une plus grande capacité volumique. En comparaison avec l'hydrogène comprimé à 700 bars qui présente une capacité volumique de 42 kg.m⁻³, l'hydrogène liquide possède une capacité massique de 70 kg.m⁻³. Cependant le stockage sous forme liquide de l'hydrogène nécessite un réservoir ayant une parfaite isolation thermique ce qui est très difficile et coûteux à mettre en œuvre. Ainsi, une faible quantité d'hydrogène s'évapore constamment augmentant la pression au sein du réservoir. Pour éviter tout risque d'explosion, l'hydrogène doit alors être ventilé par une soupape, induisant une perte non négligeable au cours du temps. Enfin, l'énergie requise pour liquéfier l'hydrogène consomme environ 30% du contenu énergétique du gaz. Cette forme de stockage est utilisée pour des applications très particulières comme la propulsion spatiale.

I.2.5.3. Le stockage sous forme solide

Contrairement à ce que son nom indique, le stockage solide de l'hydrogène ne fait pas intervenir la forme solide de ce dernier. L'hydrogène apparaît comme un « invité » chez un « hôte » qui est sous forme solide. Deux méthodes se distinguent, la physisorption et la chimisorption.

(a) La physisorption :

Certains matériaux carbonés poreux offrent une surface spécifique (surface par gramme de matériau) élevée. Les molécules de dihydrogène peuvent venir se coller en surface, ce qui constitue le phénomène d'adsorption. La liaison H-H n'est pas dissociée lors de cette réaction. Les matériaux organo-métalliques nanoporeux (MOF) se présentent également comme acteurs potentiels à la physisorption. Leur faible masse permet d'obtenir des capacités massiques élevées. L'inconvénient majeur de ce type de stockage est sa température faible de fonctionnement, de l'ordre de -196°C sous pression ambiante, afin de permettre aux liaisons de type Van der Waals de tenir face à l'agitation thermique du gaz. De nombreuses études sur ce sujet sont actuellement en cours.

(b) La chimisorption :

L'hydrogène peut également être stocké dans un matériau solide en étant absorbé. La liaison covalente H-H de la molécule de dihydrogène est alors brisée et les atomes d'hydrogène vont former une nouvelle liaison avec la structure du matériau. Cette liaison peut être ionique comme dans le composé LiH ou $\text{Li}^+ \text{H}^-$ - mais ce type de composé n'est réversible que dans des conditions poussées. Un dérivé des hydrures ioniques est l'hydrure complexe. L'hydrogène va se complexer avec un métal. C'est le cas pour le composé LiAlH_4 ou $\text{Li}^+ (\text{AlH}_4)^-$. Ces matériaux atteignent des capacités massiques et volumiques importantes. Toutefois, les problèmes de réversibilité et de réactivité à l'eau des hydrures ioniques se retrouvent ici également.

Enfin, l'hydrogène peut également être stocké en étant absorbé sous forme d'hydrure métallique. Les atomes d'hydrogènes s'insèrent réversiblement dans les sites interstitiels d'une matrice métallique. Cette méthode présente l'avantage de fonctionner dans des conditions de température et de pression proche de l'ambiant et d'apporter des capacités volumiques importantes.

I.2.6. Avantages et inconvénients de l'hydrogène

I.2.6.1. Les avantages

- ❖ L'avantage majeur est que l'hydrogène produit environ 2.8 fois l'énergie par unité de masse que l'essence et quand l'hydrogène est brûlé, la seule émission qu'il fait la vapeur d'eau, donc un avantage important de l'H₂ est une fois brûlé, le CO₂ n'est pas produit ;
- ❖ L'H₂ est l'élément le plus abondant dans l'univers « eau », ce qui représente environ 3/4 de toutes les matières, il est facile à produire et à transporté ;
- ❖ Il est non polluant, non toxique et très léger (diffusion aisée dans l'eau), Il offre un Combustible idéal des piles et permet de la réduction de la dépendance du pétrole.

I.2.6.2. Les inconvénients

- ❖ Sa légèreté implique une densité énergétique volumique moins favorable au transport et au stockage sous forme gazeuse, que pour le gaz naturel.
- ❖ Ses limites d'inflammabilité et de détonation avec l'air sont plus larges que celles du gaz naturel. En dehors d'une situation dite « confinée » « c'est-à-dire que le gaz est emprisonné avec de l'air dans un volume fermé ».
- ❖ L'hydrogène est moins dangereux que le gaz naturel. En situation confinée, l'énergie explosive théorique par m³ de gaz est 3,5 fois plus faible pour l'hydrogène. L'énergie minimale à fournir pour l'enflammer est 10 fois plus faible que pour celle d'hydrocarbures classiques et sa flamme est presque invisible.
- ❖ Son image dans le public n'est pas bonne et son acceptabilité (n'est donc pas encore acquise).

I.2.7. Considération de production d'hydrogène

Afin d'être économiquement et écologiquement viable, la production d'hydrogène doit répondre à trois critères [8] :

- Compétitivité : les coûts de production ne doivent pas être trop élevés.
- Rendement énergétique : la production d'hydrogène ne doit pas nécessiter trop d'énergie.
- Propreté : le processus de fabrication doit être non polluant sous peine d'annuler l'un des principaux atouts de l'hydrogène.

I.2.8. Les procédés de production d'hydrogène

I.2.8.1. Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures

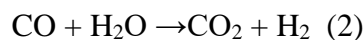
(a) Produit de l'hydrogène à partir la vaporeformage

La production actuelle d'hydrogène repose essentiellement sur le vapocraquage du gaz naturel ou vaporeformage. Aujourd'hui, c'est le cas de 95% de l'hydrogène produit. Le procédé le plus courant est le vaporeformage de Méthane ;

On fait réagir le gaz naturel de la vapeur d'eau à une température de l'ordre de 900°C et à une pression de 20 à 30 bars, et à $\Delta H=206$ KJ/mol, en présence d'un catalyseur au nickel.

Après la réaction : $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ (1).

On obtient un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Le processus continue par la conversion du monoxyde de carbone en dioxyde de carbone CO_2 et hydrogène additionnel à une température de 200 à 400°C et à $\Delta H=-41$ KJ/mol, selon la réaction :



Au total, pour une molécule de CH_4 , on obtient par ce procédé quatre molécules d'hydrogène à $\Delta H=165$ KJ/mol, selon la réaction : $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ (3)

(b) Produit de l'hydrogène à partir l'oxydation partielle

L'oxydation partielle d'hydrocarbures est la deuxième méthode utilisée pour produire de l'hydrogène, via la production de gaz de synthèse (mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène). Cette méthode s'applique aux résidus pétroliers lourds ainsi qu'au charbon. Elle met en œuvre des températures très élevées (1200 à 1500°C), des pressions importantes (de 20 à 90 bar ou plus), de l'oxygène et de la vapeur d'eau. Ces conditions techniques difficiles et coûteuses se justifient par le prix de la matière première peu élevé.

I.2.8.2. Produit de l'hydrogène à partir la gazéification

Dans le procédé de gazéification, du charbon de bois est brûlé dans un réacteur. À très haute température (entre 1200 et 1500°C), les gaz libérés se reforment pour donner du H_2 et du monoxyde de carbone (CO).

I.2.8.3. Produit de l'hydrogène à partir d'algues vertes et bactéries (biologique)

Les algues seraient une autre possibilité pour produire de l'hydrogène. En effet, au cours de la photosynthèse, les plantes vertes dissocient l'eau en hydrogène et oxygène. L'hydrogène est combiné au CO_2 pour construire des tissus végétaux tandis que l'oxygène est libéré dans

l'atmosphère. On peut espérer que ce type de procédé pourra être techniquement au point d'ici 2 ans, et sur le marché d'ici 5 à 8 ans.

I.2.8.4. Produit de l'hydrogène à partir l'énergie nucléaire

Les réserves nucléaires de la Terre sont considérables. C'est pourquoi l'utilisation de l'énergie nucléaire qui a l'avantage de ne pas produire de CO₂ est donc envisagée pour produire de l'hydrogène. Les possibilités de production s'orientent vers la dissociation de la molécule d'eau qui est, elle aussi, très abondante. Cette dissociation peut se faire selon deux voies :

- L'électrolyse de l'eau par du courant électrique produit par une centrale nucléaire
- Des cycles thermochimiques endothermiques alimentés en chaleur par une centrale Nucléaire. Les cycles thermochimiques présentent un rendement énergétique supérieur: de l'ordre de 50%, voire 60% en cas de cogénération d'électricité. Dans cette voie, l'énergie nucléaire est utilisée pour apporter la chaleur nécessaire à la réalisation des réactions. Il s'agit de cycles car la dissociation de l'eau est réalisée suite à plusieurs réactions dont les sous-produits sont réinvestis.

Tableau 2: les méthodes de la production d'hydrogène [9]

	Couleur	Technologie	Source d'énergie ou d'électricité	Empreinte carbone ¹	Terminologie ²
Production via biomasse	Hydrogène vert	Thermolyse	Biomasse	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène renouvelable
	Hydrogène vert	Vaporeformage	Biométhane	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène renouvelable
Production via l'électricité	Hydrogène vert	Electrolyse de l'eau	Solaire, éolienne, hydroélectricité	Minimale (< 2 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène renouvelable
	Hydrogène rose		Nucléaire	Minimale (< 2 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène bas-carbone
	Hydrogène jaune		Réseau électrique (FR)	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène bas-carbone
Production via les énergies fossiles	Hydrogène bleu	Vaporeformage Gazéification	Gas naturel + CCUS Charbon	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène bas-carbone
	Hydrogène turquoise	Pyrolyse	Gaz naturel	Noir de carbone (co-produit)	/
	Hydrogène gris	Vaporeformage		Elevée (~ 11 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène carboné
	Hydrogène marron	Gazéification	Lignite	Très élevée (> 20 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène carboné
	Hydrogène noir		Charbon bitumineux	Très élevée (> 20 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène carboné

I.3. Aperçu L'hydrogène vert

Les techniques conventionnelles utilisées pour la production d'hydrogène, sont toutefois liées à la pollution de l'environnement dans le monde entier. C'est pour cette raison que le secteur de l'énergie et de l'environnement s'efforce de développer des moyens plus durables de produire de l'hydrogène à partir des ressources renouvelables.

I.3.1. Définition de l'hydrogène vert

L'hydrogène qui répond à certains critères de durabilité est appelé hydrogène "vert", mais il n'existe pas encore de définition universellement reconnue, car il n'y a pas de norme internationale pour l'hydrogène vert. [10], mais l'hydrogène vert est généralement considéré comme étant produit de manière propre et durable, à l'aide d'une source renouvelable telle que l'énergie solaire ou éolienne.

I.3.2. Les techniques de production de l'hydrogène vert

I.3.2.1. Le craquage de l'eau

L'eau est considérée comme la source la plus abondante pour la production d'hydrogène, qui est composé des atomes d'hydrogène et d'oxygène. Par conséquent, si on le donne suffisamment d'énergie, ses molécules se diviseront en hydrogène et en oxygène. Plusieurs technologies peuvent être adoptées pour fractionner l'eau. Certaines de ces technologies sont détaillées ci-dessous.

(a) Technique de production par électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau ne représente actuellement que quelques pour-cent de la totalité de l'hydrogène produit. Néanmoins, comme elle est un mode de production a priori propre qui fournit de l'hydrogène de pureté élevée, elle est de ce fait du plus haut intérêt pour des applications telles que les piles à combustible.

Actuellement, des électrolyseurs de petite capacité, typiquement de 1 à 100 kW, sont développés, parallèlement à l'électrolyse industrielle à forte puissance (unités pouvant aller jusqu'à plusieurs mégawatts) utilisée en secours d'autres moyens de production d'hydrogène ou encore pour stocker les excédents d'électricité, L'électrolyse de l'eau est un procédé électrochimique permettant, grâce à de l'énergie électrique, de décomposer de l'eau en hydrogène et oxygène. Au cours de ce procédé, l'énergie électrique apportée au système est transformée en énergie chimique sous forme d'hydrogène. Nous discutons plus en détail de cette technique dans le chapitre suivant [11]

(b) Technique de production par thermolyse

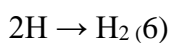
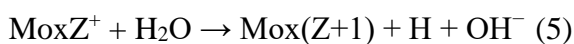
La thermolyse de l'eau, appelée aussi dissociation thermique de l'eau en une seule étape, est présentée par l'équation : $\text{H}_2\text{O} + \text{chaleur} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$ (4)

La réaction dans cette approche nécessite une source de chaleur pour pouvoir obtenir un niveau raisonnable de dissociation ; cette source de chaleur doit être capable de fournir des températures supérieures à 2500 K. Un autre défi associé à cette forme de production d'hydrogène est le coût élevé de ses équipements en raison de la nécessité de résister aux conditions sévères présentées précédemment. Différentes technologies sont donc proposées afin de réaliser la thermolyse à des températures plus basses. L'une de ces approches consiste à conduire la réaction en plusieurs phases à l'aide de catalyseurs ; cependant, la nécessité d'utiliser des réactifs très corrosifs pose également des problèmes au niveau de l'équipement et peut avoir un impact négatif sur l'environnement. [12]

(c) Photolyse de l'eau pour la production d'hydrogène

L'eau peut en principe libérer de l'hydrogène, ce qui se produit lorsque les molécules d'eau absorbent de l'énergie à un taux de 285,57 kJ/mole d'eau à partir du rayonnement ultraviolet. La dissociation des liaisons H-O par les photons est connue sous le nom de photolyse, qui se produit à environ 190 nm.

Ce processus et la thermolyse nécessitent des catalyseurs chimiques tels que le ZrO_2 [13], l'oxyde d'étain (SnO), oxyde de zinc (ZnO) et d'autres oxydes de soufre semi-conducteurs selon les équations (5) et (6) :

**I.3.2.2. Processus de production d'hydrogène par la biomasse**

L'hydrogène associé à la biomasse peut être produit sous diverses formes. Cela comprend la conversion thermochimique des déchets de bois, la photocatalyse (PC) des déchets solides municipaux, la lignine, la sciure de bois, les résidus forestiers, les déchets agricoles, la cellulose, les polyols, la fermentation des microalgues et du manioc, le biométhane (biogaz), et le reformage du goudron à la vapeur de la biomasse gazéifiée, etc.

Même si la production d'hydrogène à partir de la biomasse entraîne un certain rejet de CO_2 , la quantité d'émissions gazeuses est égale à la quantité absorbée par les organismes au cours de

leur vie. Les mécanismes biologiques et thermochimiques sont les deux approches qui peuvent être utilisées pour produire de l'hydrogène à partir de la biomasse. [14]

(a) Le processus biologique

➤ Processus de fermentation sombre :

La fermentation sombre consiste à la génération de bio-hydrogène via la conversion de la biomasse, elle a un ratio d'énergie nette équivalent à 1,9, alors que celui du reformage du méthane à la vapeur est égal à 0,64. La production d'hydrogène peut être réalisée par des bactéries anaérobies. [15]

➤ Processus de photo-fermentation :

Les bactéries photosynthétiques anaérobies, en particulier les bactéries violettes sans soufre, sont capables de convertir les ions H^+ en H_2 gazeux dans le processus, en utilisant le pouvoir réducteur et l'énergie lumineuse obtenus à partir de l'oxydation de composés organiques tels que les acides gras de faible poids moléculaire. Ce mécanisme est considéré comme très prometteuse Attrayante du fait de l'absence de réactions génératrices d'oxygène, de la disponibilité d'une large gamme d'ensoleillement, du haut rendement de conversion du substrat et de la possibilité de combiner cette forme de procédé générateur d'hydrogène avec le traitement des déchets. [16]

➤ Processus de bio-photolyse :

C'est un processus biologique dont le principe s'apparente à la photosynthèse des algues et des plantes et qui convient à la production d'hydrogène. Seule la réduction du dioxyde de carbone se produit dans les plantes vertes car il n'y a pas d'enzyme qui catalyse la formation d'hydrogène. Cependant, les algues ont des enzymes productrices d'hydrogène qui peuvent produire de l'hydrogène dans certaines circonstances. [17]

(b) Le processus thermochimique

Les méthodes thermochimiques sont des systèmes qui consistent à convertir la biomasse en gaz riches en hydrogène et en hydrogène. Ces méthodes sont essentiellement basées sur la gazéification et la pyrolyse. Ces deux derniers produisent du CH_4 et du CO , entre autres produits gazeux

➤ La pyrolyse :

Dans cette technique, le chauffage et la gazéification de la matière organique brute s'effectuent dans une gamme de température de 500-900 °C à une pression de 0,1-0,5 MPa. Le processus se déroule en l'absence d'air et d'oxygène, et par conséquent, il n'y aura pas de formation d'oxydes de carbone qui nécessiterait des réacteurs secondaires. Cependant, dans la situation où il y a la présence d'eau ou air (c'est-à-dire que les matériaux ne sont pas séchés), il y aura une émission importante de COx. [18]

➤ La gazéification de la biomasse :

Il s'agit d'un processus d'oxydation partielle à haute température dans lequel la biomasse, qui est une matière première carbonée solide, est transformée en un mélange gazeux (CH₄, CO₂, H₂, CO, goudron, hydrocarbures légers, cendres, contaminants mineurs et charbon) à l'aide d'agents de gazéification. La gazéification de la biomasse se produit normalement dans une plage de températures de 700 à 1200 °C, en utilisant de l'oxygène, de l'air, de la vapeur ou leur combinaison comme agent de gazéification. La vapeur favorise la formation de H₂ et génère un gaz à haut pouvoir calorifique sans azote. Même si la gazéification à la vapeur a un coût énergétique plus élevé que la gazéification à l'air en raison de sa nature hautement endothermique, elle évite la nécessité d'un processus coûteux de séparation de l'oxygène. [19]

➤ La Combustion de la biomasse :

Il s'agit essentiellement de la combustion de toute forme de combustible pour libérer de l'énergie sous forme de chaleur en présence d'air. Dans ce mécanisme, la biomasse est brûlée directement dans un four ou une chaudière en présence d'un excès d'air, qui peut être utilisé pour générer de la vapeur, qui est utilisée pour entraîner des turbines, des compresseurs ou des pompes tout au long du processus chimique. La biomasse présente des avantages en tant que matière première de combustion en raison de la forte réactivité du charbon et du combustible résultants et de la forte volatilité du combustible. La combustion de la biomasse n'est généralement pas adaptée à la production d'hydrogène car elle produit de grandes quantités de dioxyde de carbone. Le rendement en hydrogène de la combustion de la biomasse algale était de 9,56 % en volume. Plusieurs autres gaz sont libérés, tels que NO_x, SO_x, CO_x et CH₄. Tout cela dépend de la composition et de la source de la biomasse. Le traitement de ces gaz est coûteux et augmente le coût global du procédé. [20]

I.3.2.3. Processus de production d'hydrogène par la technologie de plasma

La technologie plasma convient au traitement d'une large gamme de polluants gazeux en raison de ses nombreux avantages par rapport à d'autres technologies telles que le traitement non

sélectif, des rendements énergétiques plus élevés, la densité énergétique et les températures élevées, ainsi que des temps de réaction rapides. [21]

La technologie des plasmas est apparue comme un candidat potentiel pour améliorer l'efficacité de la production d'hydrogène vert. Les processus chimiques impliqués dans la synthèse peuvent être contrôlés à l'aide des technologies du plasma. Divers moyens tels que les micro-ondes et les décharges d'étincelles peuvent être utilisés pour produire le plasma nécessaire, ce qui rend cette technologie très polyvalente. [22]

(a) Le procédé de fabrication de noir de carbone par plasma :

Cette technologie est basée sur la plasmalyse du méthane, une décomposition de la molécule à l'aide d'un plasma basse énergie, généré par micro-ondes. Elle fonctionne en l'absence d'oxygène, et dans le but d'atteindre des conditions énergétiques similaires à celles du vaporeformage ; c'est-à-dire à un coût énergétique très bas, et donc, potentiellement, à un coût de production de l'hydrogène très compétitif

Utilisé comme matière première et non comme combustible, le méthane permet ainsi la production d'hydrogène sans émission de dioxyde de carbone. Au CO₂ gazeux se substitue en effet un carbone sous forme solide : le « noir de carbone ». Sans conséquence directe sur le climat, ce carbone solide trouve même de multiples applications industrielles. [23]

(b) La gazéification au plasma :

C'est un moyen efficace d'utiliser les déchets et d'évoluer vers une économie circulaire. Avec une gestion prudente des procédés du système, il s'agit également d'une source prometteuse d'hydrogène neutre en carbone pour soutenir l'économie croissante de l'hydrogène. Les chalumeaux plasma fonctionnent en faisant circuler du gaz entre deux électrodes pour créer un panache de plasma (gaz ionisé) pouvant atteindre des températures supérieures à 6 000 °C. À de telles températures élevées, la torche peut être utilisée pour gazéifier les déchets solides. La gazéification par plasma convertit les déchets organiques en gaz de synthèse (principalement Hydrogène H₂ et Monoxyde de carbone CO) et les déchets inorganiques et métalliques en scories.

Lors de la gazéification au plasma, le gaz de synthèse produit est séparé en CO et H₂. Le CO peut ensuite être brûlé pour produire de l'énergie pour alimenter le procédé, ce qui augmente efficacement l'efficacité énergétique et minimise les déchets. Cependant, il produit également du CO₂. L'efficacité et la propreté de la gazéification au plasma dépendent également de la

qualité de la séparation, du traitement et de l'utilisation du gaz de synthèse. Si la configuration appropriée est utilisée, la gazéification a le potentiel de transformer les déchets en hydrogène vraiment vert. [24]

I.3.3. Estimation des coûts de production de l'hydrogène vert

Au stade de la production, le coût de l'énergie (c'est-à-dire les énergies renouvelables ou fossiles) est la clé des coûts variables et affecte donc la compétitivité ultime de chaque technologie ; selon le Conseil de l'hydrogène, l'hydrogène est utilisé en grande quantité en 2020 ; il environ 8 % des besoins énergétiques mondiaux, avec un coût de production d'environ 2,50\$/kg. Les coûts de production devraient chuter à environ 1,80 \$/kg d'ici 2030, ce qui couvrirait environ 15 % de la demande énergétique globale. Le tableau 3 résume les récentes estimations de coûts pour certaines technologies de production d'hydrogène. [25]

Tableau 3: estimations des couts des différentes techniques de production d'hydrogène.

Production Mechanism	Cost, \$/kg	Efficiency of Process, %
Electrolysis	10.30	60–80
Thermolysis	7.98–8.40	20–45
Photolysis	8–10	0.06
Dark fermentation	2.57	60–80
Gasification	1.77–2.05	30–40
Photo fermentation	2.83	0.1
Steam reforming	2.27	74–85
Pyrolysis	1.59–1.70	35–50
Indirect bio photolysis	1.42	-
Direct bio photolysis	2.13	-
Solar thermal electrolysis	5.10–10.49	-
Solar thermolysis	7.98–8.40	-
Wind electrolysis	5.89–6.03	-
Photo-electrolysis	10.36	0.06

I.3.4. les limites des technologies de production de l'hydrogène vert

- ❖ Absence de chaîne de valeur pour l'hydrogène propre est considérée comme l'un des principaux obstacles à surmonter dans le secteur pour contribuer au développement d'une économie de l'hydrogène à faible empreinte carbonique ;
- ❖ Le stockage et le transport de l'hydrogène restent un point faible des systèmes énergétiques de l'hydrogène, Une augmentation de l'efficacité de ces méthodes est liée à la résolution de deux questions principales : la conversion de l'hydrogène en un système à plus haute densité (par exemple, la liquéfaction) et l'amélioration de la sécurité de transport et des réservoirs de stockage ;
- ❖ le coût de production de l'hydrogène est relativement élevé en raison de l'immaturité de ses technologies, ce qui empêche toute concurrence avec les technologies conventionnelles basées sur les ressources en hydrocarbures ;
- ❖ il s'agit d'un marché en développement qui nécessite des normes et des réglementations internationales, qui ne sont pas disponibles actuellement, ce qui constitue un obstacle majeur au développement d'un marché mondial de l'hydrogène ;
- ❖ le secteur de l'hydrogène présente des risques dans sa chaîne d'approvisionnement ainsi que des incertitudes sur son marché, qui devraient persister pendant un certain temps, en particulier lorsque les marges sur le produit final sont restreintes ;
- ❖ L'hydrogène ayant une barrière énergétique très faible de 0,017 mJ pour la combustion dans l'air, et une plage d'inflammabilité élevée de 4 à 74 %, il a tendance à brûler très facilement avec peu de sources d'allumage/d'étincelles ; en outre, il est très difficile d'éteindre une telle flamme en combustion.

I.4. Conclusion

En raison de sa dépendance aux combustibles fossiles pour produire de l'électricité, l'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique qui peut aider à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). Par conséquent, ce chapitre fournit un résumé complet des différentes technologies pouvant être utilisées pour produire de l'hydrogène propre, des limites de ces technologies et des défis qui entravent le développement de l'économie de l'hydrogène, principalement le manque de chaîne de valeur de l'hydrogène propre, le stockage de l'hydrogène et le transport, les coûts de production élevés et l'absence de normes internationales, le risque d'investissement et l'inflammabilité.

Chapitre II :
Notions de bases sur
les électrolyseurs et les
distillateurs solaires

II.1. Introduction

Comme expliqué précédemment dans le premier chapitre, l'hydrogène vert, d'une grande importance sur le plan économique et environnemental, est fabriqué à partir d'eau distillée par le procédé d'électrolyse, qui dépend de sources d'énergies renouvelables.

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques définitions et concepts de base sur l'électrolyseur, ainsi que le processus de distillation solaire, les types de distillats solaires et leurs caractéristiques les plus importantes, cet axe est précédé par des informations de base sur le rayonnement solaire.

II.2. L'électrolyseur

II.2.1. Principe général sur l'électrolyseur

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique qui divise l'eau en l'hydrogène et l'oxygène sont obtenus en appliquant une différence de potentiel entre deux électrodes immersion dans une cellule d'électrolyse, qui produit un champ électrique directionnel, où mouvement ionique (les cations se dirigent vers la cathode, les anions se dirigent vers la cathode anode).

II.2.2. Fonctionnement d'un électrolyseur

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique qui divise l'eau en Hydrogène (2H) on utilisant un courant électrique.

Nous étudions donc la dégradation de l'eau dans le cadre d'un courant électrique. L'analyseur électrique se compose de deux électrodes et conducteur de solution électrique extraction. Le processus se fait en alimentant les deux pôles en courant électrique Immergé dans la solution de livraison.

En raison de la migration électronique, les ions positifs sont transférés à la cathode tandis que les ions négatifs, à la anode. Dans les électrodes, des dépôts bruts ou bouillants sont formés selon le type d'ions trouvés dans la solution. Dispositifs de stockage les extraits obtenus varient en fonction de leur état (invasif ou solide).

II.2.3. Alimentations d'un électrolyseur

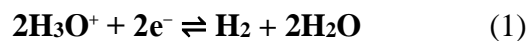
Il existe quatre types d'alimentation électrique de l'analyseur par des générateurs continus. Il peut distinguer les deux Après électrolyse.

Le signal est obtenu à partir du correcteur CA à double rotation. Un autre type d'alimentation est la source d'alimentation pour utiliser le courant d'impulsion élevé Fréquence.

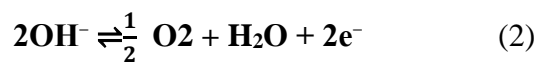
Phénomènes qui se produit dans les électrodes sont les mêmes. Système d'alimentation en signifie ajouter de l'acide ou une solution de base.

Lorsque l'acide sulfurique disparaît dissoudre dans l'eau, l'eau et les molécules acides se désintègrent en ions. C'est la même chose. Elle se produit lors de la dissolution de l'hydroxyde de sodium (NaOH). La dissociation en l'ion des molécules crée une conduction ionique ou électrolyte dans l'eau. Dans le cas d'une solution acide, l'ion H_3O^+ se déplace vers l'électrode négative.

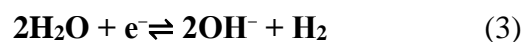
Quand le cation part de l'anode, la réaction au niveau de la cathode est telle que :



Au niveau de l'anode, l'équation bilan de la réaction de production de dioxygène s'écrit :



Dans le cas de l'hydroxyde de sodium, l'atome d'hydrogène se déplace vers la cathode et de l'oxygène à l'anode. La désintégration de l'eau se produit dans les électrodes et L'équation se réfère à la production hydrogène.



Anode est le pôle connecté à l'extrémité positive du générateur et tous anions vont vers eux. Joue le rôle de la production de dioxygène.

Cathode est le pôle connecté au côté négatif du générateur où tous les cations migrent vers eux.

II.2.4. Les Différents types d'électrolyseur

II.2.4.1. Electrolyseur alcalin

L'électrolyse alcaline est la technologie la plus célèbre pour la production L'électrolyse de l'hydrogène composés mais également pour la production de nombreux composés chimiques dont le chlore, l'industrie chimique a un très haut niveau de maturité industrielle .Dans l'analyseur électrique alcalin, l'électrolyte est une solution humide Hydroxyde de potassium (KOH). La connexion ionique est alors garantie par des ions Hydroxyde (OH^-) et potassium (K^+). Interactions anodiques et cathodiques décrites [27] :

- à l'anode : $2\text{OH}^- \rightarrow 1/2 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
- à la cathode : $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$

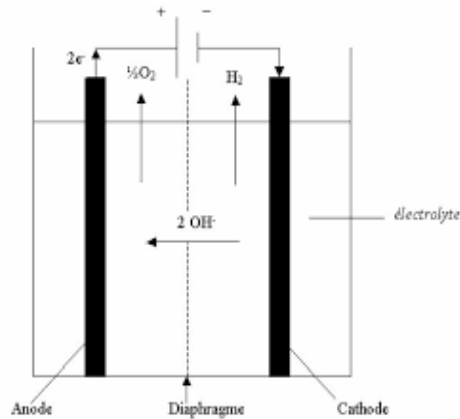


Figure II.1 : principe de l'électrolyse alcaline. [43]

II.2.4.2. Électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM)

Le principal avantage de cet analyseur électrique est son électrolyte solide, qui se compose de membrane polymère. Ainsi, il assure la livraison d'ions d'hydronium (H_3O^+) anode et permet la séparation des gaz produits (H_2 et O_2), selon les interactions [27] :

- à l'anode : $3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 1/2 \text{O}_2 + 2\text{H}_3\text{O}^+ + 2\text{e}^-$ (3)
- à la cathode : $2\text{H}_3\text{O}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ (4)

Principe d'électrolyse PEM le rendement dépend principalement des propriétés de la membrane et Stimuli utilisés. Ces deux composants restent les principaux composants. Verrous technologiques pour l'analyse électrique PEM.

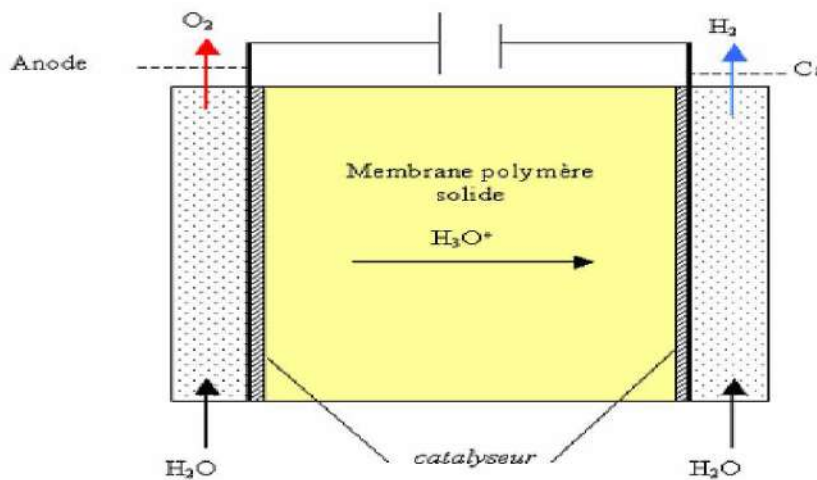


Figure II.2 : schéma de l'électrolyse PEM. [43]

II.2.4.3. Electrolyseur à haute température

Le principe de l'électrolyse à haute température (700 à 1000°C), repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode.

Cette décomposition dépend alors de la nature de l'électrolyte toute fois, les hautes températures nécessitent l'utilisation de matériaux spécifiques : c'est pourquoi l'électrolyte et les électrodes sont conçus à base de céramiques [28].

Celui-ci peut assurer soit une conduction protonique soit une conduction d'ions super oxydes O_2^- .

Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont décrites ci-dessous en fonction du type d'électrolyte [27]

➤ **Électrolyte à conduction d'ions super oxydes :**

- à l'anode : $2O_2^- \rightarrow O_2 + 4e^-$
- à la cathode : $2H_2O + 4e^- \rightarrow 2O_2^- + 2H_2$

➤ **Électrolyte à conduction protonique :**

- à l'anode : $2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^-$
- à la cathode : $4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$

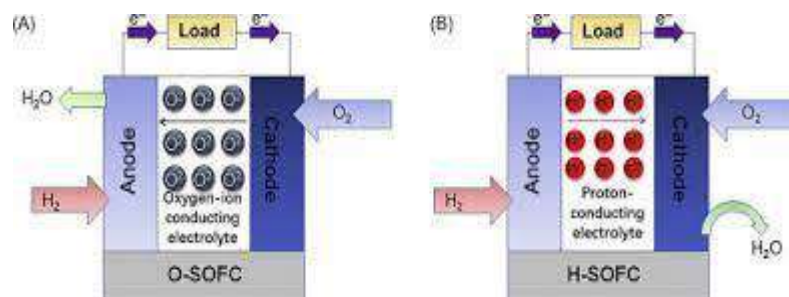


Figure II.3 : principe d'une électrolyse à haute température. [44]

II.3. Les distillateurs solaires

II.3.1. Introduction

L'eau distillée est l'eau produite par l'évaporation et la condensation de l'eau impure Elle est donc théoriquement pure et exempte de minéraux. L'eau distillée a un pH à température ambiante Environ 5,4 est dû au (CO₂) dans lequel il se dissout et se comporte comme un acide. Ceci est incroyable L'acidité a tendance à augmenter en raison des émissions de

dioxyde de carbone. La conductivité électrique de l'eau distillée est proche de celle de l'eau pure presque nul.

II.3.2. Notions de bases

II.3.2.1. Le soleil

Le soleil est une sphère gazeuse, son diamètre d'environ 1.39×10^9 m, et sa masse est de l'ordre de 2×10^{30} kg, son âge est d'environ 4.6×10^6 ans, sa distance moyenne à la terre est de 149500000 km. Cette étoile est le siège de réactions thermonucléaires transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'Hélium et les 4 millions de tonnes dont le soleil est aussi allégé à chaque seconde sont transformés en énergie et dispersés sous forme du rayonnement. La température du cœur est de l'ordre de 107K tandis que la température de surface de soleil est 5760 °K [29].

II.3.2.2. La terre

La terre se déplace autour du soleil d'une trajectoire éclipitique, la révolution complète s'effectue en une année sidérale de 365 jours 6 heures 9 minutes, 10 secondes. Cette révolution fait varier les durées relatives du jour et de la nuit au rythme des saisons limitées par les deux équinoxes et les deux solstices [29].

- Equinoxe de printemps correspond à 21 mars ;
- Equinoxe d'automne correspond à 23 septembre ;
- Solstice d'été correspond à 22 juin ;
- Solstice d'hiver correspond à 22 décembre ;
- La distance entre le soleil et la terre peut être calculée par la relation suivante :

$$d(n) = 1 - 0.017 \cos\left[\frac{360}{365} (n - 2)\right] \quad (1.1)$$

$d(n)$: Donnée en UA.

n : est le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er janvier.

II.3.2.3. Relation soleil-terre

La terre tourne autour de soleil sur une trajectoire (ellipse), le plan de cette ellipse s'appelle l'écliptique (**figure II.4**). L'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé déclinaison δ elle varie au cours de l'année entre -23.45° et $+23.45^\circ$ [30].

$$\delta = 23.45^\circ \sin[(0.89^\circ nj) + 284] \quad (1.2)$$

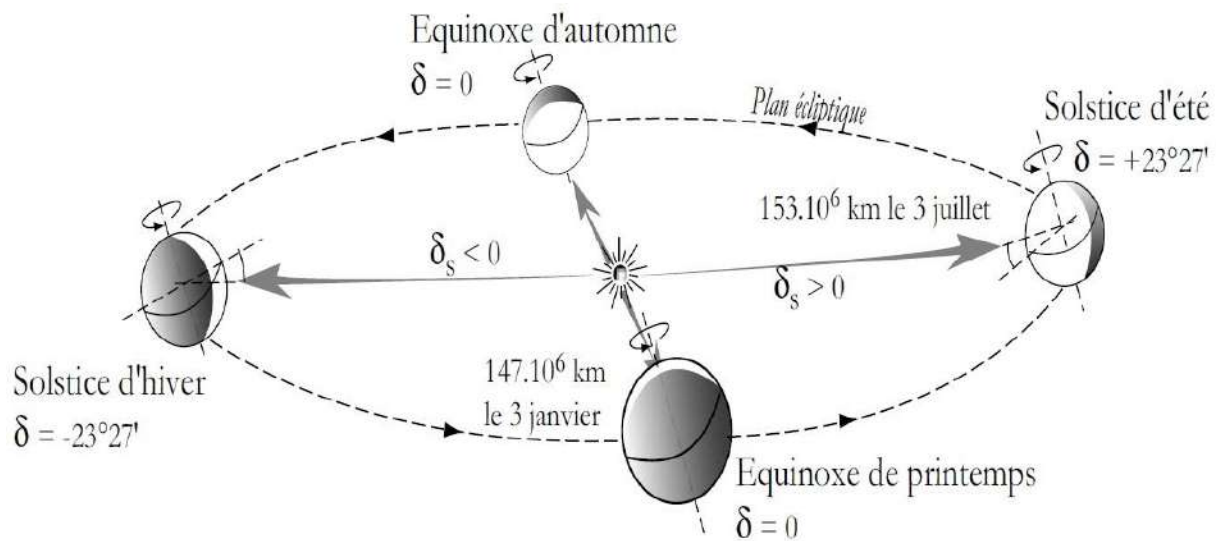


Figure II.4 : Mouvement de la terre autour du soleil. [45]

II.3.2.4. Rayonnement solaire

L'énergie solaire est une énergie rayonnante de courte longueur d'onde l'intensité globale du rayonnement solaire arrivant aux confins de l'atmosphère est constante et égale à 1.94 cal/mn par cm² normal aux rayons, soit $I_0 = 1.353 \text{ kW/m}^2$ cette valeur s'appelle constant solaire et cette constante qui dépend de la distance soleil - terre est corrigée par le facteur de correction $C(n)$ [31].

$$d(n) = 1 - 0.017 \cos\left[\frac{360}{365} (n - 2)\right] \quad (1.3)$$

II.3.2.5. Irradiation

Les cartes solaires (**figure II.5**) possèdent une importance considérable dans le domaine de la conception des systèmes de production d'énergie solaire. L'utilisation de ces cartes permettra aux concepteurs de ces systèmes d'améliorer le rendement de la production d'énergie en fonction du climat local grâce à ces cartes.

Les produits et matériaux de production utilisés ainsi que leurs configurations pourront être adoptés d'une manière optimale [31].

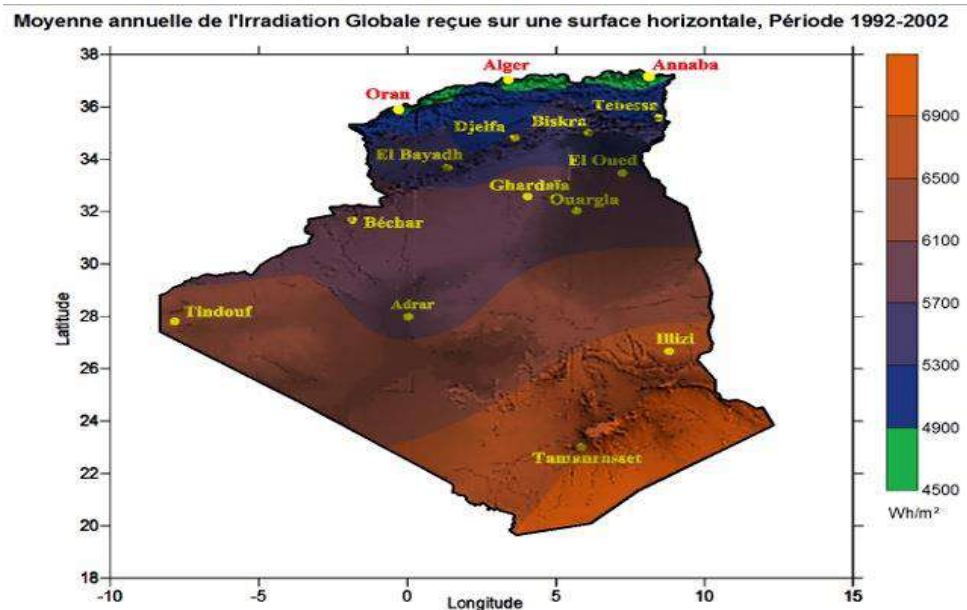


Figure II.5 : Carte solaire de l'Algérie. [47]

II.3.2.6. Effet de serre

Lorsque le rayonnement solaire frappe une paroi vitrée (figure II.6), une partie sera réfléchiée, une partie sera absorbée puis réémise et le reste sera directement transmis.

Ce rayonnement direct transmis à l'intérieur des locaux est partiellement absorbé par les parois qui s'échauffent et par la suite le rayonnement infrarouge est réémis dans toutes les directions.

Le vitrage étant pratiquement opaque au rayonnement réémis, celui-ci reste piégé à l'intérieur du local, y entraînant une augmentation de la température. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre [32].

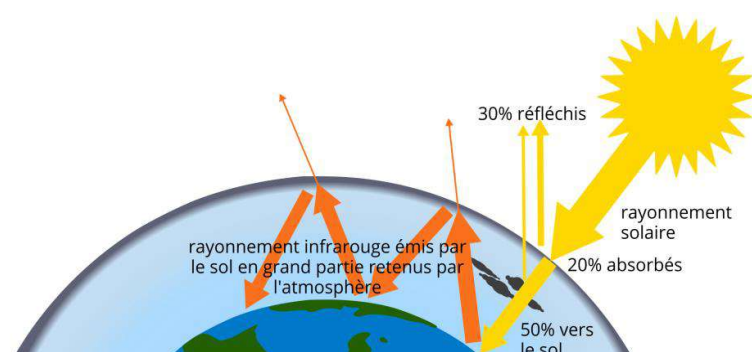


Figure II.6 : Effet de serre. [21]

II.3.3. Différents types de distillateurs

Il existe plusieurs types de distillateurs solaires. Ils peuvent être différents, en termes de conception et en termes de matériaux utilisés, mais ils utilisent tous le même principe et servant aux mêmes fonctions.

II.3.3.1. Distillation solaire à effet de serre

Un distillateur solaire habituellement fait de feuille d'Aluminium en forme rectangulaire. Il est recouvert d'un matériel transparent et l'intérieur de sa base est noirci pour maximiser l'absorption de l'énergie solaire. L'eau salée est versée dans le bassin de métal et exposée aux rayons du soleil. Le couvercle transparent laisse pénétrer les radiations solaires qui sont absorbées en grande partie par le fond noir. Atteint sa saturation en vapeur d'eau, l'humidité relative est alors de 100%. La vapeur d'eau se condense sur le vitrage refroidi par l'air ambiant. Il y a formation de gouttes d'eau qui s'écoulent vers la partie inférieure du vitrage dans une gouttière qui conduit au réservoir de stockage. Cet appareil peut produire en moyenne 4,9 litres d'eau distillée par jour par m^2 .

Les distillateurs solaires simples (bassin simple) ont été largement étudiés et leur comportement est bien maîtrisé. Une efficacité de 25% est typique. La productivité journalière en fonction de l'irradiation solaire est plus grande en soirée où l'eau à distiller est encore chaude quand les températures extérieures chutent. [33]

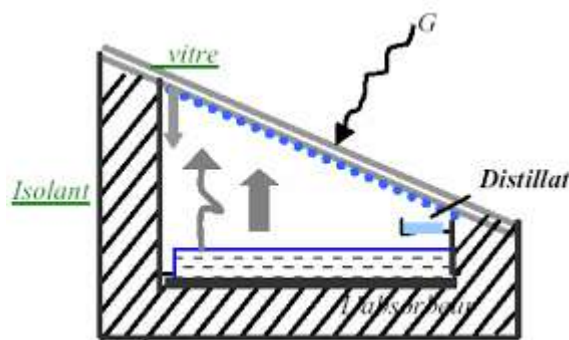


Figure II.7 : Distillation solaire et ses composants. [49]

L'augmentation de la température due à l'effet de serre T'échauffe l'eau qui s'évaporé. La capacité d'évaporation augmente en fonction de la température jusqu'à ce que l'air

Soit une serre fermée et exposée au soleil à l'intérieure de laquelle se trouve une lame d'eau de mer ou d'eau saumâtre de quelques centimètres d'épaisseur. L'air à l'intérieur de la serre est surchauffé et saturé de vapeur d'eau (douce) qui se condense au contact de la paroi en verre

relativement froide. Les gouttes d'eau douce peuvent être recueillies en bas du vitrage dans une gouttière. [34]

II.3.3.2. Distillateur à simple effet

C'est un distillateur à un seul évaporateur, le plus connu est le distillateur type bassin. Il existe plusieurs modèles de ce type.

- Distillateur à pente unique.

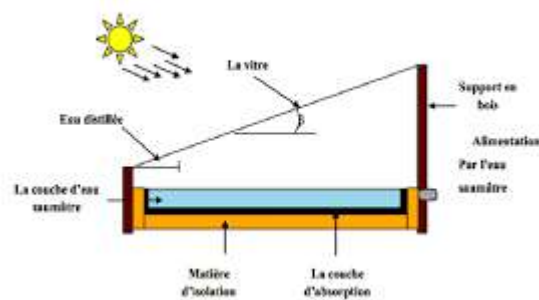


Figure II.8 : Distillateur à simple effet avec un seul capteur. [50]

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.

II.3.3.3. Distillateur solaire à double pente

C'est un distillateur à double capteurs où chacun d'eux est incliné d'un angle, son avantage est d'exposer un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation

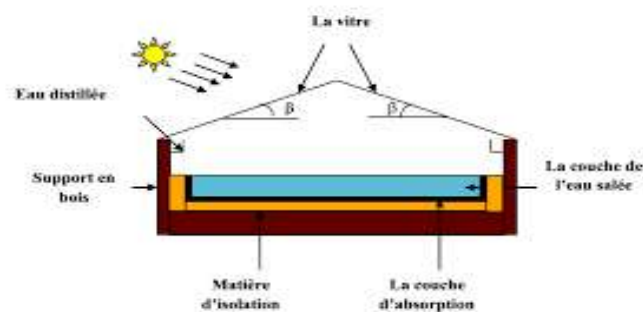


Figure II.9 : Distillateur solaire à simple effet avec deux capteurs. [50]

II.3.3.4. Distillateur sphérique à balayage

C'est un distillateur en plexiglas (figure II.10), composé de trois parties principales ; une demi-sphère supérieure qui transmet le rayonnement solaire d'une part et joue le rôle de surface de condensation d'autre part, une demi-sphère inférieure qui récupère le distillât et un bac horizontal en métal noir contenant l'eau à distiller qui se trouve dans le plan médian. Un essuie-glace entraîné par moteur électrique, permet de maintenir la surface de condensation au rayonnement, et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes. Le principe de fonctionnement est similaire à celui du distillateur plan. [35]

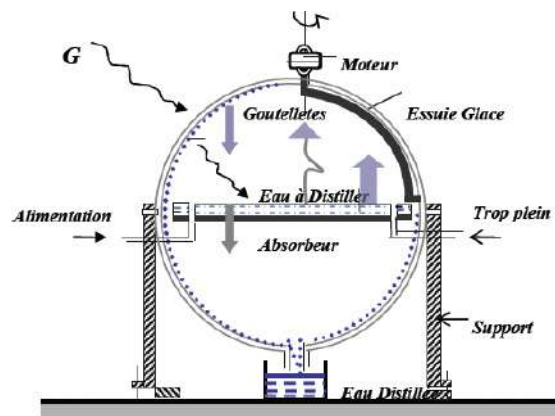


Figure II.10 : Distillateur solaire sphérique à balayage. [51]

II.3.3.5. Distillateur solaire vertical [10]

Le distillateur solaire vertical est composé d'un capteur solaire permettant la captation du rayonnement solaire.

- D'un compartiment d'évaporation.
- D'un compartiment de condensation.

La (figure II.11), présente le principe de fonctionnement du distillateur vertical. Le distillateur est alimenté par l'eau saumâtre à partir d'un réservoir (1), le distillateur est connecté au réservoir à l'aide d'un tube en cuivre (2), le débit d'eau l'entrée du distillateur est régulé à l'aide d'une vanne (3). La position du réservoir d'alimentation permet l'alimentation du distillateur par un débit constant. Un distributeur d'eau (4), muni de perforations sur la longueur, permet la distribution de l'eau en film sur le tissu spongieux (5), l'eau ruisselle sur le tissu, et la saumure est évacuée en bas (6).

L'eau qui s'écoule derrière l'absorbeur (7), s'évapore dans le compartiment d'évaporation, le mélange d'eau et d'air à l'intérieur saturé en vapeur d'eau circule naturellement à travers les

deux ouvertures (8) réalisées dans une cloison isolée vers le compartiment de condensation (9), 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 (figure II.11) fabriquée en dessous de la plaque de condensation.

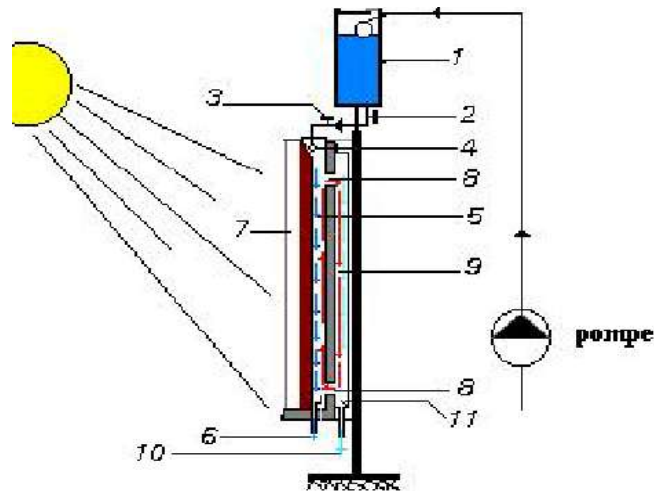


Figure II.11 : distillateur solaire vertical. [37]

II.3.3.6. Distillateur solaire incliné à cascades

Cet appareil présente deux avantages : la lame d'eau est très faible et l'orientation par rapport au rayonnement incident se rapproche davantage de l'optimum. N'a été réalisé qu'en petite taille. Il est constitué de plusieurs bassins horizontaux placés et alimentés en cascades, l'eau salée arrivant dans le bassin du haut. Ces appareils fonctionnent bien mais leur construction et leur entretien sont coûteux [38].



Figure II.12 : Distillateur solaire incliné à cascades. [51]

II.3.3.7. Distillateur à étages multiples

Dans ce distillateur seul, le bassin inférieur (1) est alimenté en énergie thermique. Lorsque l'eau de ce bassin est chauffée, elle s'évapore et se condense sur la surface inférieure du bassin conique situé au-dessus (2). Il y a formation de gouttes d'eau qui s'écoulent vers une gouttière (3) qui les conduit au bac de stockage. Lors de la condensation de la vapeur d'eau, l'énergie de conversion de phase, appelée aussi l'enthalpie d'évaporation, est libérée. Cette énergie chauffe l'eau contenue dans l'étage supérieur qui s'évapore à son tour et se condense sur la surface inférieure de l'étage suivant (4) et ainsi de suite. De cette manière, l'énergie prévue pour chauffer l'eau du bassin inférieur, est récupérée, du moins en grande partie, pour être utilisée plusieurs fois. Ce processus de récupération de chaleur a un effet multiplicateur sur la production d'eau potable. Le remplissage du distillateur s'effectue à partir du dernier étage. Le système est alimenté en eau saline à un débit deux fois plus élevé que celui de l'eau évaporée. Quantité d'eau injectée continuellement à travers les tuyaux de débordement (6) a pour buts

- De compenser la quantité d'eau évaporée ;
- D'éviter une accumulation des sels dans les bassins ;
- De contribuer à conserver les gradients de température entre les étages.

Le circuit entre le capteur solaire qui est la source d'énergie et l'unité de distillation fonctionne en thermosiphon ; il n'y a donc pas de pompe nécessitant une source d'énergie supplémentaire qui risque de ne pas exister dans les régions retirées. Pour éviter une surpression, une huile végétale est utilisée comme fluide caloporteur car la température peut dépasser les 100°C. L'installation de dessalement peut fonctionner 24 heures sur 24, lorsqu'on combine la chaleur provenant des capteurs solaires à celle récupérée d'un groupe électrogène par exemple. Tout en assurant une alimentation électrique au hameau, la chaleur provenant du groupe peut être récupérée et utilisée pour le dessalement de l'eau, lorsque le soleil est absent, particulièrement la nuit. Durant le jour cette chaleur peut être stockée [43].

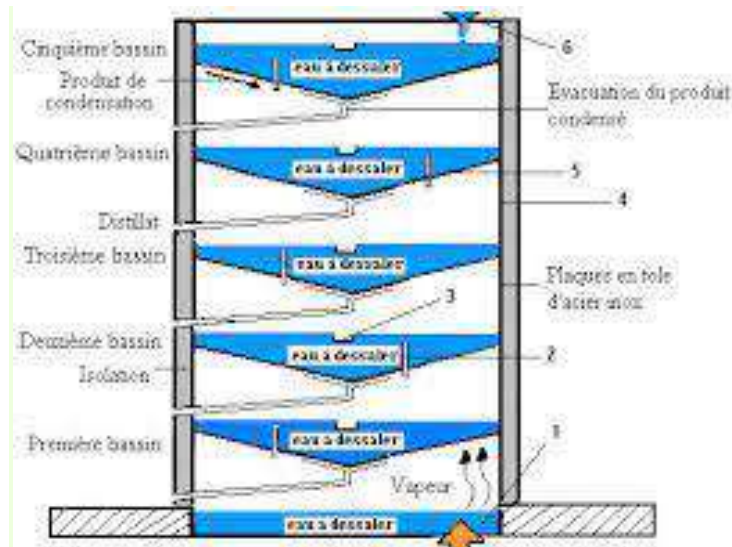


Figure II. 13 : Distillateur à étages multiples. [51]

II.3.4. L'opération de distillation solaire

II.3.4.1. Paramètres influents

Les paramètres influents sur un distillateur solaire.

II.3.4.1.1. Paramètres géométriques

Parmi les paramètres géométriques importants :

(a) L'inclinaison de la vitre sur le plan horizontal

Si l'inclinaison de la vitre augmente, la partie ombragée du plan d'eau augmente en générale. Donc il y a intérêt à choisir une inclinaison minimale, sans décollement des gouttes d'eau évidemment, une valeur courante est 15° [38].

(b) Hauteur du niveau de la masse d'eau à distiller

La production journalière de distillat augmente quand la hauteur du niveau diminue car l'inertie du système devient plus faible [38].

(c) La distance qui sépare la surface libre de la saumure au vitrage

La distance entre la surface libre de la saumure et le toit des deux collecteurs influence directement la pression à l'intérieur de l'alambic. L'augmentation de l'enceinte provoque une diminution de la pression, influençant donc les échanges thermiques et cela provoque une diminution des températures des composants du distillateur et inversement.

(d) La transparence du vitrage

Le nombre de couverts transparents utilisés dans un distillateur solaire ne pas augmenter la production, car elle augmente la température du couvercle interne (surface de condensation), mais elle a aussi maintenu le dispositif étanche à l'air, grâce à une double couverture en verre une réduction de 25-35% de la production a été remarqué. Utilise également un couvercle en verre à double augmente le coût initial de distillateur [39].

(e) Autres paramètres

Isolation fixe, accumulation de couche de sel, émissivité, absorptivité, réflectivité et transmissivité de la surface absorbante et de la couverture.

II.3.4.1.2. Paramètres météorologiques**(a) L'intensité du rayonnement solaire**

C'est une énergie rayonnante de courte longueur d'onde (0.17 à 4 μm). Le maximum d'intensité est obtenu pour la longueur d'onde 0.47 μm dans le spectre visible. L'intensité globale du rayonnement solaire arrivant aux confins de l'atmosphère sur une surface perpendiculaire est constante et égale à 1.35KW/m². Cependant, l'énergie qui atteint la surface terrestre est atténuée par l'absorption d'une partie du rayonnement par l'atmosphère. Le coefficient de transmission est assez constant en cours d'année et se situe entre 0.7 et 0.9 [14].

(b) Température ambiante

L'effet des variations de température ambiante sur la productivité d'une distillerie solaire est examiné par plusieurs chercheurs. Les résultats numériques ont montré qu'un Une légère augmentation de 3 % de la productivité des alambics solaires est obtenue en augmentation de la température ambiante de 5°C [40].

(c) Vitesse du vent

La vitesse du vent a peu d'effet sur la productivité, mais des vitesses de vent faibles augmenter les taux de production par rapport aux conditions de vent nul. L'augmentation la vitesse du vent augmente la perte de chaleur par convection du toit à température ambiante. Cela provoque une diminution de la température de surface de condensation et augmente par conséquent l'efficacité d'un distillateur .D'autre part les calculs numériques montrent que lorsque la vitesse du vent passe de 1 à 9 m / s, la productivité diminue de 13% [40].

(d) Autres paramètres

L'humidité de l'air, la pluviométrie et l'intermittence des nuages doivent être prises en considération car la distillation en hiver n'est pas la même en été [40].

II.3.4.2. Caractéristiques et performances du distillateur

Pour caractériser le distillateur solaire, plusieurs grandeurs sont définies. Nous différenciation : production de distillats, conversion, efficacité, rendement et Performance.

(a) La production et le taux conversion :

Le débit massique de l'eau distillée est donné par la relation suivante :

$$md = \frac{Q_{evp}}{L_v} \tag{2.1}$$

La production en distillat solaire, représentant la quantité d'eau distillée Surface d'évaporation par mètre carré et rendement par jour, la formule de calcul est Intégrez les relations précédentes sur un intervalle de temps. On peut aussi définir une quantité très importante, qui est le taux de conversion Indique le rapport de l'eau distillée à l'eau saumâtre entrer dans l'alambic [41].

$$Q = - \frac{md}{\int_{tcs}^{tfs} mdt} \tag{2.2}$$

(b) L'efficacité globale :

L'efficacité journalière totale est le rapport entre la chaleur utilisée Par la quantité d'énergie incidente totale évaporée, elle peut être calculée par formule suivante :

$$\frac{Q_{evp}}{G.S} + \frac{md}{G.S} \tag{2.3}$$

(c) L'efficacité interne :

L'efficacité interne est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps et la quantité d'énergie effectivement absorbée par la saumure par unité de temps, elle se calcule par la formule suivante :

$$\eta_i = \frac{Q_{evp}}{Q_{eau}} = \frac{md}{at G.S} \text{ at } L_v \tag{2.4}$$

Pour une intensité globale G, l'expression Q_{eau} devient

$$Q_{eau} = \tau v \alpha \epsilon + \tau v \tau \epsilon \alpha f . G.S \tag{2.5}$$

Qeau: Flux thermique effectivement reçu par la masse d'eau

Si on pose que :

$$\alpha t = \tau v \alpha e + \tau v \tau e \alpha f \quad (2.6)$$

Donc

$$\eta_i = \frac{\eta g}{\alpha t} \quad (2.7)$$

τv : coefficient de transmission de la vitre .

τe : coefficient de transmission de l'eau.

αe : coefficient d'absorption de l'eau.

αf : coefficient d'absorption de la fond du distillateur.

αt : coefficient d'absorption fictif du distillateur .

Le coefficient αt dépend de l'angle d'incidence du rayonnement incident par rapport à la vitre.

Performance Dans le souci de caractériser un distillateur d'une manière plus absolue, nous avons été amenés à définir les facteurs de performance brut (F.P.B) et horaire (F.P.H) :

$$FPH = \frac{\text{Quantité d'eau produite au out d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}}$$

$$FPB = \frac{\text{Quantité d'eau produite au out de 24 heures}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24 heures}}$$

(d) Le rendement :

C'est la quantité d'eau produite par unité de surface de plan noir et par jour. L'inconvénient majeur de ce critère est qu'il ne fait pas mention de l'énergie solaire qui arrive sur le distillateur.

Le rendement d'un distillateur simple est : [41]

$$\eta = \frac{m d}{G \cdot h \cdot \text{evp}} \quad (2.8)$$

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu une brève étude bibliographique de l'alambic solaire au niveau (Algérie) et aussi sur le monde et ceci pour obtenir Une idée claire sur ce domaine. Selon les travaux des scientifiques, ils notent la diversité méthodes et techniques utilisées pour améliorer le phénomène de distillation Solaire

Nous avons vu aussi des différents procédés de distillation solaire et des différents modèles de distillateurs existants, car ils résument le principe de fonctionnement chaque appareil. Et sa relation avec l'électrolyte, qui à son tour entre dans la production d'hydrogène vert.

Nous avons choisi le distillateur solaire à pente unique (ou à simple pente).

Les raisons du choix elle est la facilité de construction, Le bas coût du système et la facilité de maintenance.

Chapitre III :
Présentation de quelques
applications sur l'efficacité et
de dimensionnement de
distillateurs solaires à travers
la littérature

III.1. Introduction

Afin d'enrichir notre étude, avec des recherches sur le thème de dimensionnement des distillateurs solaires et l'étude de leur efficacité, On va présenter dans ce chapitre quelques applications diverses (expérimentales, numériques, modélisation, etc.), sur ce thème à travers la littérature, comme indiqué ci-dessous :

- a) Étude paramétrique théorique et expérimentale d'un distillateur solaire ;
- b) Modélisation et analyse des performances d'une unité de dessalement solaire.

III.2. Étude paramétrique théorique et expérimentale d'un distillateur solaire

Ce travail intitulé ci-dessus a été réalisé en la faculté de Génie mécanique, Université Kafrelsheikh- Egypte, par les chercheurs : A.E. Kabeel , A. Khalil , Z.M. Omara , M.M. Younes en 2012.

III.2.1. Objectif

L'objectif de ce travail est d'étudier les performances d'un alambic solaire à étages en :

1. Utilisation de plateaux de profondeur et de largeur différente ;
2. Ajout de mèche sur les côtés verticaux ;
3. Fournir de l'eau préchauffée dans le distillateur solaire.

III.2.2. Matériels et méthodes

Les chercheurs ont utilisé simultanément deux capteurs solaires, et tous deux utilisent de l'eau salée ; un distillateur solaire conventionnel à pente unique et un distillateur solaire à gradins modifié. Ils ont étudié l'influence de la profondeur et de la largeur de plateaux sur les performances du distillateur solaire à étages étudiée.

Dans ce expérimentale les chercheurs utilisent les matériaux suivants :

Deux capteurs solaires ont été conçus et construits pour performance des systèmes de dessalement solaire. La (Figure III.1) montre une photo de l'installation expérimentale érigée. En outre, le diagramme de la configuration expérimentale est montré dans la fig.3- 2. Il se compose d'une solution saline réservoir d'eau, un collecteur solaire à tube à vide, un alambic conventionnel (unique bassin solaire encore) et un distillateur solaire à gradins. La Superficie du bassin du conventionnel 1 m^2 (0,5 m 2,0 m). La profondeur hauteur de paroi basse est de 160 mm. Le capteur solaire est en acier galvanisé feuilles. Les surfaces entières du bassin sont enduites de peinture noire de l'intérieur pour augmenter l'absorptivité.

En outre, l'alambic est isolé du fond aux parois latérales avec de la sciure de 4 cm d'épaisseur pour réduire la perte de chaleur de l'alambic à l'ambient. La couche isolante est soutenue par un cadre. Le bassin est recouvert d'une feuille de verre transparent 3 mm d'épaisseur incliné à près de 30° horizontalement, qui est la latitude de Kafrelsheikh, Egypte, à maximiser la quantité de rayonnement solaire incident. L'ensemble de configuration expérimental, est maintenu dans la direction sud pour recevoir le maximum de rayonnement solaire tout au long de l'année.



Figure III.1 : Une photo présente le montage expérimental.

III.2.3. Méthodologie de ce travail

Des expériences ont été effectuées les chercheurs, à partir de 9 h au soleil de juillet à novembre 2010.

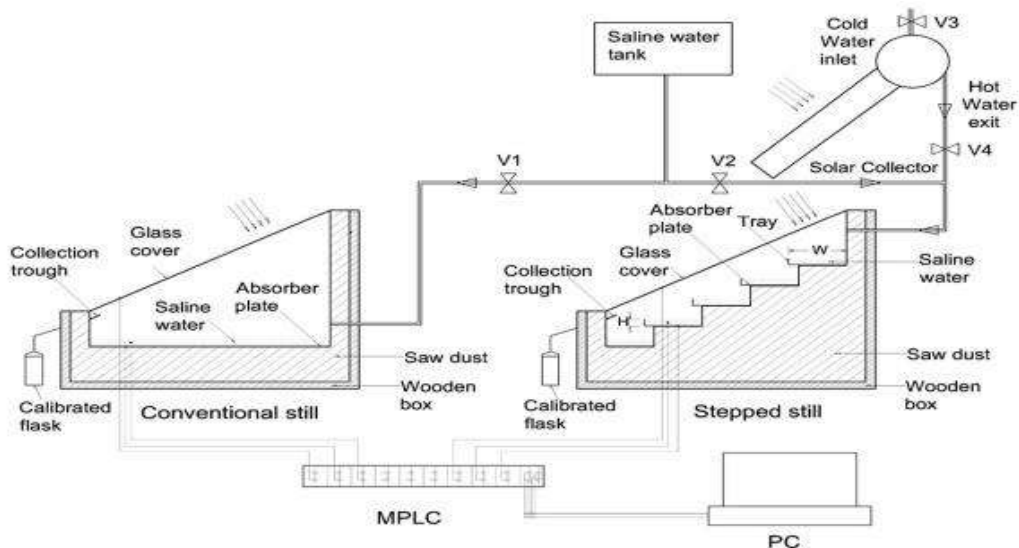


Figure III.2 : Diagramme schématique de l'installation expérimentale.

Le rayonnement solaire, la température ambiante et les températures de : la plaque du bassin, l'eau saline, le verre et l'eau distillée sont mesurées chaque heure, toute la journée.

La quantité la productivité pendant la journée est également mesurée. La profondeur de la saline l'eau dans les alambics solaires est maintenue constante pendant l'expérience. Toutes mesures ont été réalisées pour évaluer le rendement du capteur solaire conventionnel et du capteur solaire étagé sous les conditions de l'extérieur de la ville de Kafrelsheikh.

L'effet de différentes profondeurs d'eau saline sur la performance sont étudiés ; à savoir 5, 10 et 20 mm. Quatre groupes d'expériences sont effectuées. Le premier groupe est fait avec de l'eau profondeur maintenue constante à 5 mm dans chaque capteur. La marche a encore plateaux de hauteur 5 mm et testés avec différentes largeurs de plateau 100, 110, 120 et 130 mm. Une mèche sur les côtés verticaux a été utilisée. Aussi l'effet de la température de l'eau d'alimentation dans le capteur est étudié, en utilisant des tubes sous vide capteur solaire.

Dans le deuxième et le troisième groupes la profondeur de l'eau est maintenue constante dans chaque capteur, à 10 et 20 mm ; respectivement. Le quatrième groupe est une référence cas, pour obtenir la profondeur qui donne la productivité plus élevée dans le capteur.

De sorte que, le capteur conventionnel avec de l'eau à profondeur constante de 10 mm, est testé et comparé avec le capteur modifié à profondeurs d'eau 5, 10 et 20 mm et largeur des plateaux 120 mm.

III.2.4. Modèle théorique

Les résultats analytiques sont obtenus par la résolution des équations du bilan énergétique pour la plaque absorbante, l'eau saline bassin et la température de la vitre peut être évaluée à tout moment. Bilan énergétique de la plaque de cuvette et la couverture de verre de capteur.

III.2.5. Résultats et discussion

Les résultats plus importants obtenus par ces chercheurs, nous le résumons, en présentant et en analysant certaines figures mentionnées dans l'article, comme indiqué ci-dessous :

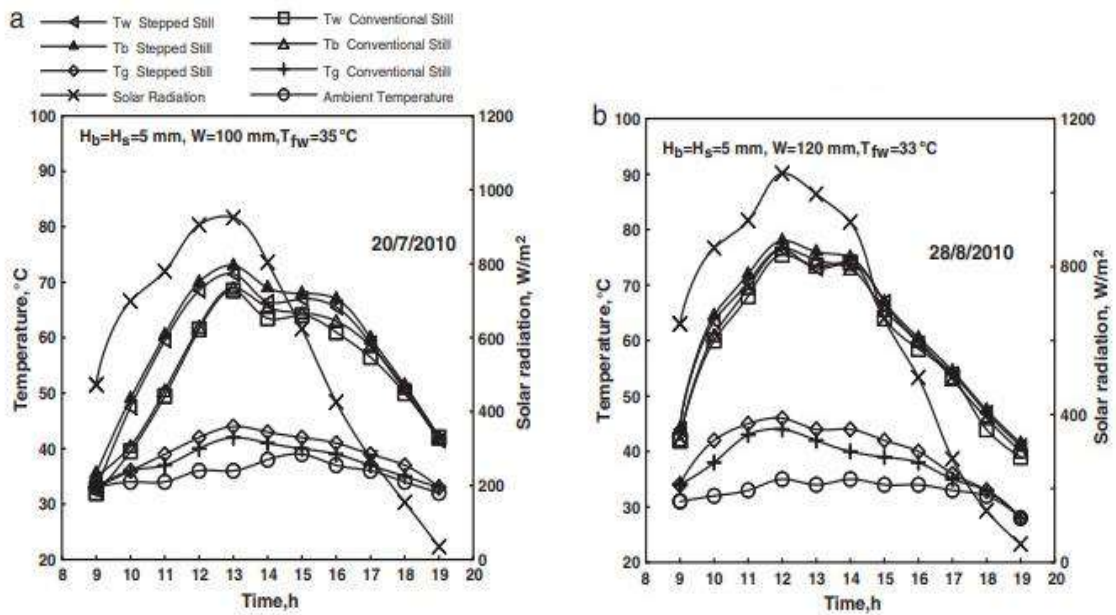


Figure III.3 : Variation horaire de température et le rayonnement solaire pour le capteur étagé et conventionnel.

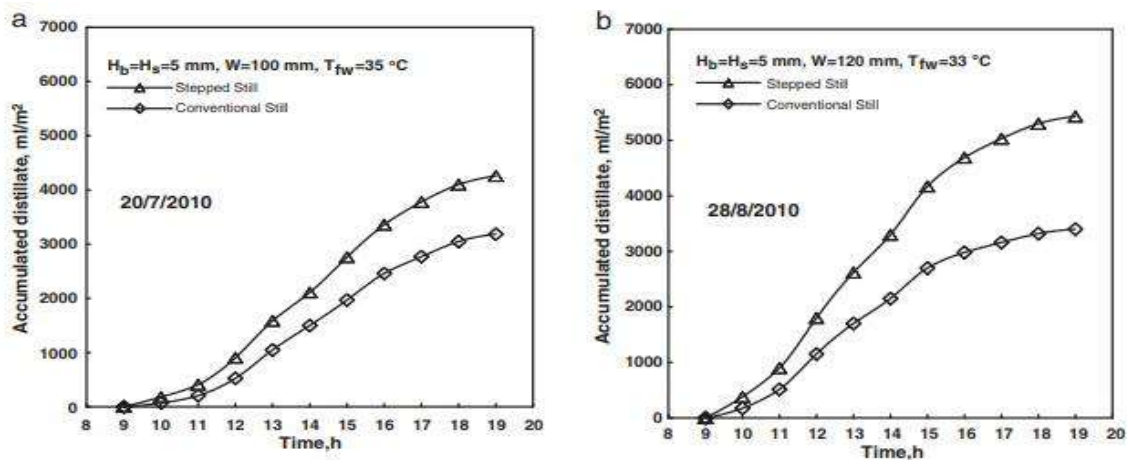


Figure III.4 : La variation cumulée de l'eau douce pour le gradué et le conventionnel.

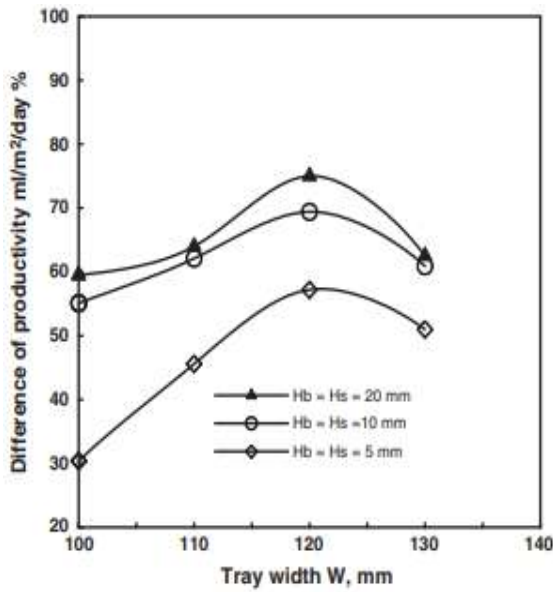


Figure III.5 : Effet de l'augmentation de la largeur du plateau sur la différence de productivité

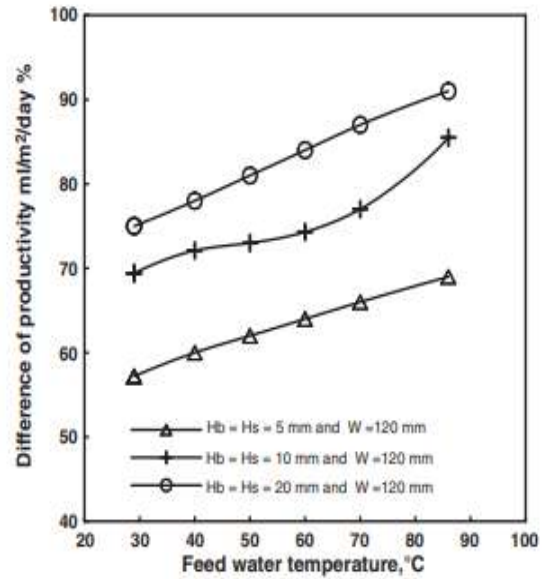


Figure III.6 : Différence de productivité avec différentes températures d'eau d'alimentation Tfw à W = 120 mm et différentes profondeurs d'eau.

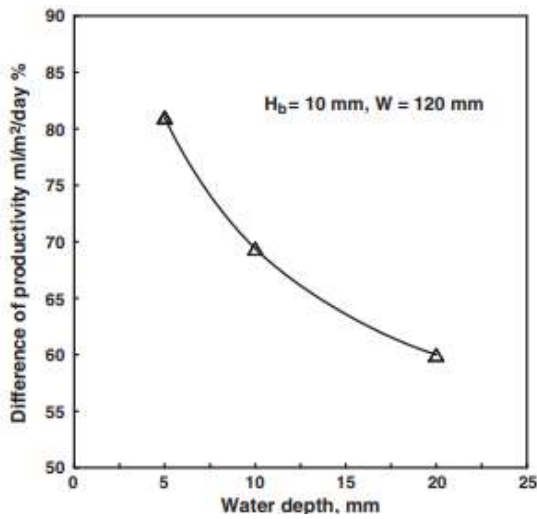


Figure III.7 : Différence de productivité avec différentes profondeurs d'eau et la même largeur de plateau et Hb = 10 mm.

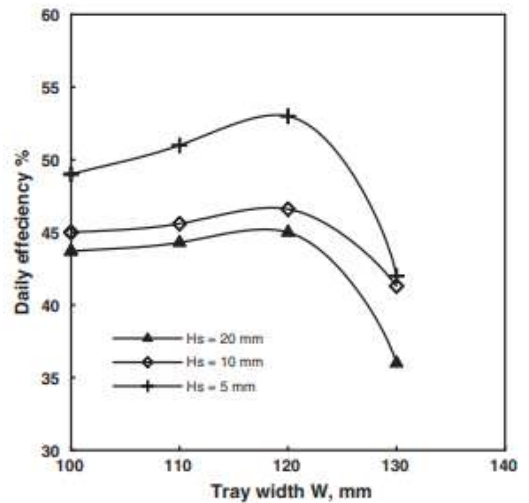


Figure III.8 : Variation quotidienne de l'efficacité pour le distillateur à différentes largeurs et profondeurs de plateau.

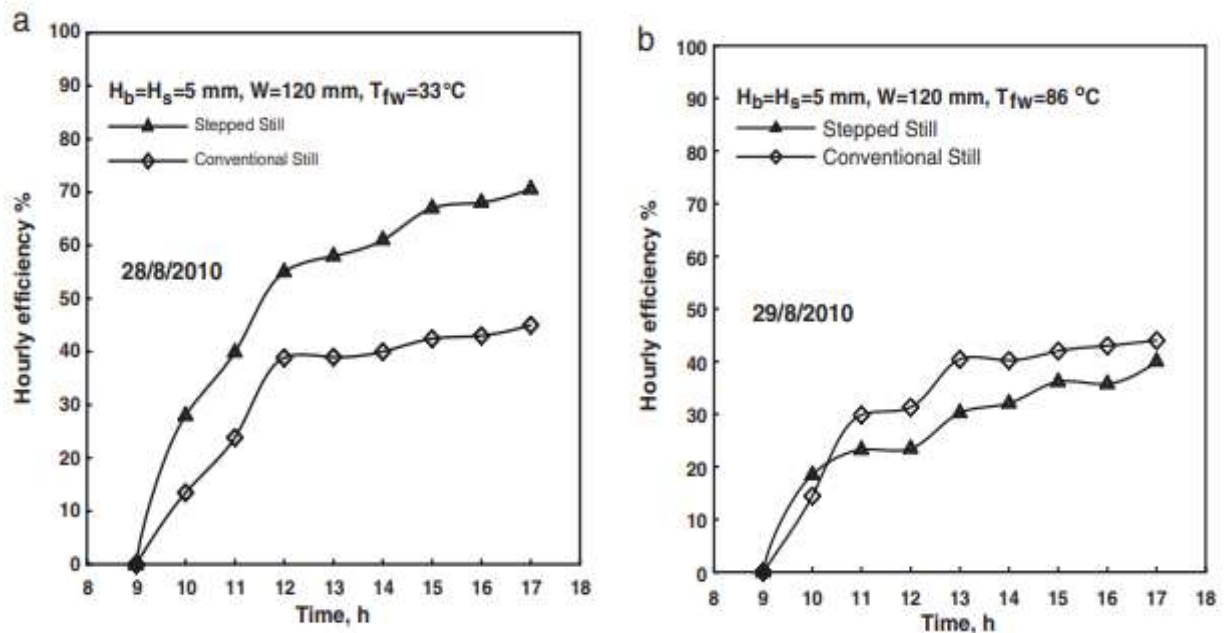


Figure III.9 : Variation d'efficacité horaire pour les distillateurs conventionnels et étagés à différentes alimentations la température de l'eau.

Des chercheurs prouvent que le rayonnement solaire a effet toutes les remarques solaires et la productivité maximale de l'eau douce dans l'après-midi présente les valeurs les plus élevées pour les systèmes de dessalement solaire actuels, et prouvent aussi la quantité de distillat accumulé pour l'énergie solaire étagée est plus élevée que celle du distillat classique encore à toute largeur de plateau, où la productivité horaire de l'eau douce est plus élevée pour pas solaire encore.

Et ajoute la différence de productivité quotidienne augmente en augmentant la largeur du plateau avec une valeur maximale à $W = 120\text{ mm}$, puis diminue à mesure que l'augmentation de la largeur du plateau en raison de l'ombre apparaît sur les éléments suivants étape et en raison de la quantité accrue d'eau saline, aussi la productivité de l'eau salée diminue encore avec l'augmentation de la profondeur. Les mêmes résultats ont été précédemment et l'utilisation de la mèche présente certains avantages et les résultats prouvent aussi que l'augmentation de la température de l'eau d'alimentation augmente la productivité du pas encore.

III.2.6. Conclusion

À partir des résultats expérimentaux et théoriques présentés sur les distillateurs étagés et conventionnels, les conclusions suivantes sont tirées par les chercheurs :

1. La productivité du distillateur étagée diminue avec l'augmentation de la profondeur d'eau.
2. La performance la plus élevée de distillateur étagé est obtenue à la profondeur de l'eau 5 mm et largeur de plateau 120 mm (57,3 % supérieur à la productivité du distillateur conventionnel).
3. L'augmentation de la productivité quotidienne du distillateur gradué, par la productivité l'utilisation 3% à 5% de la mèche du côté vertical.
4. Le préchauffage de l'eau d'alimentation du distillateur a un léger effet sur amélioration de la productivité, mais l'efficacité du système diminue environ de moitié.
5. L'efficacité quotidienne et coût estimé par litre de distillat de distillateurs solaire conventionnel est d'environ 53% - 0,039 \$.

III.3. Modélisation et analyse des performances d'une unité de dessalement solaire avec refroidissement par double vitrage

Ce travail est réalisé par les chercheurs Mousa Abu-Arabi¹, Yousef Zurigat², Hilal Al-Hinaib, Saif Al-Hiddabib.

III.3.1. Objectifs recherche par le chercheur dans ce travail

1. Modélisation et analyse de la performance de l'énergie solaire à un seul puits avec l'entrée de la saumure entre double vitre inspectée ;
2. La fonction de cet arrangement est réduite la température du verre et ainsi augmenter la différence de température de l'eau au verre ;
3. Améliore la performance représente un taux d'évaporation plus rapide que le bassin ;
4. Les constantes complètement isolées de l'énergie solaire sont encore traditionnelles supérieur tandis que le verre double excelle lorsque la perte de chaleur dépasse une certaine valeur.

III.3.2. Matériels et méthodes

Il analyse également un schéma d'énergie solaire Travaux de refroidissement à eau entre double vitrage La couverture est illustrée à la figure III.9. Noter l'énergie Équilibrer chaque composant de l'alambic Capacité en eau du bassin...etc. Double canal de verre fluide été ignorés.

En outre, la capacité de chaleur est L'eau de refroidissement est ignorée et sa température est Supposez que les changements se produisent uniquement dans la direction actuelle direction. En vertu de ces hypothèses, système d'équations différentielles décrit Modèle physique d'un alambic solaire à double vitrage comme décrit.

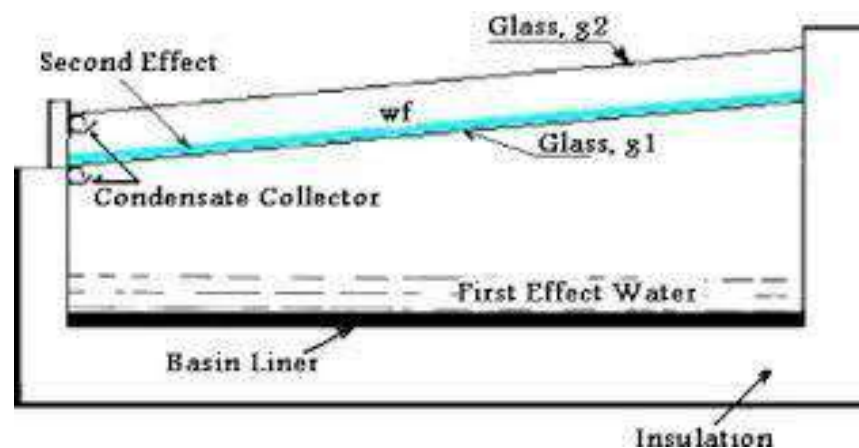


Figure III.10 : Schémas du distillateur solaire à double verre.

III.3.3. Résultats et discussion

La simulation a été menée pendant deux ans. Journées typiques (une en mars et une en juin) avec conditions climatiques à Mascate, omanie rayonnement solaire total est affiché pour ces deux jours. Température d'entrée de refroidissement l'eau s'écoule entre le double vitrage probablement fixé à 25 °c. La figure III.11 affiche le retour intégré des images fixes avec du temps pour les conditions annoncées en mars. Évidemment, le double vitrage solaire est toujours avec de l'eau.

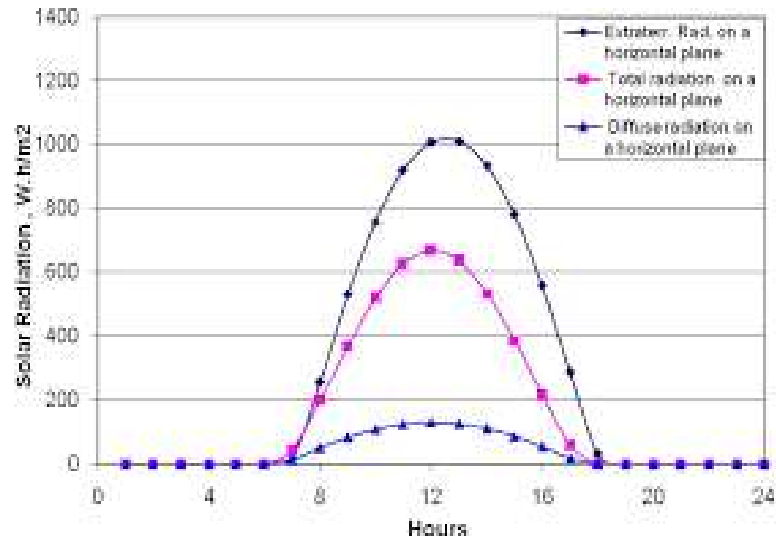


Figure III.11 : Total solaire flux on a horizontal surface for Muscat, Oman

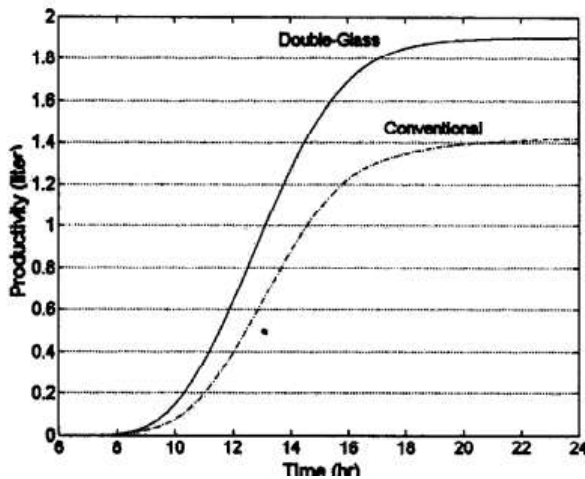


Figure III.12 : Productivité cumulée des distillateurs pour le mois de mars

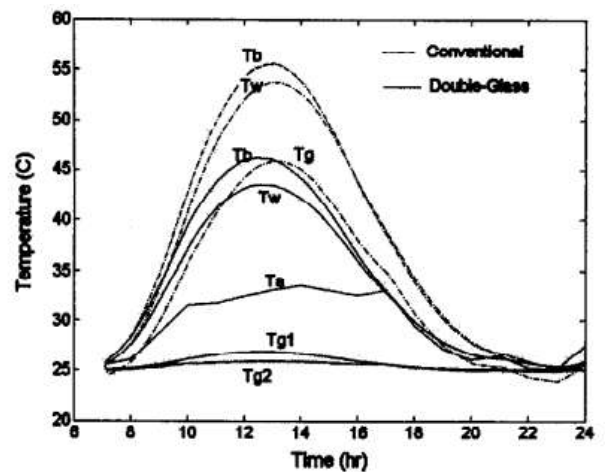


Figure III.13 : la variation de la température des différents composants du distillateur.

La figure III.12 montre le rendement intégré des distillateurs en fonction du temps pour les conditions indiquées en mars. On constate une augmentation de 34% de productivité du distillateur solaire à double vitrage avec refroidissement par rapport au distillateur solaire conventionnel. La raison de cette augmentation est évidente à partir des profils de température présentés à la Figure III.13.

La figure III.15 montre la productivité du distillateur en fonction du temps pour une journée typique de juin. Une amélioration de la performance de 35% est atteinte pour le distillateur solaire à double vitrage par rapport au conventionnel. La variation de la température des

différents éléments du distillateur est présentée à la figure 14. La nuit (19h00), la température du verre du distillateur conventionnel descend en dessous de la température ambiante car le verre se refroidit par rayonnement et pour le distillateur solaire à double vitrage, la température du verre reste inférieure à la température ambiante car la température de l'eau de refroidissement reste constante à 25°C.

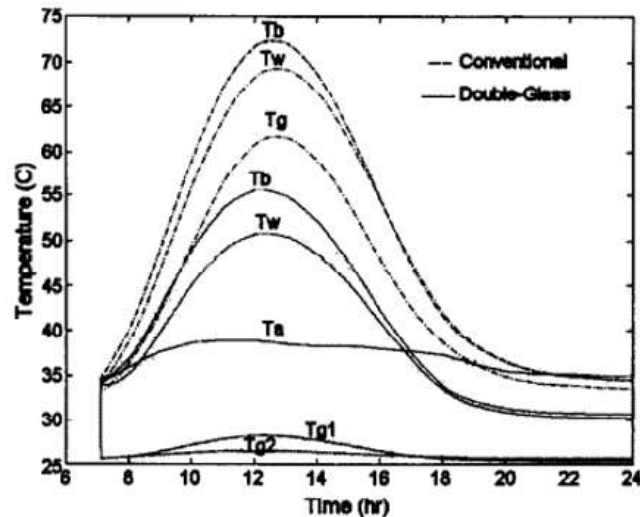


Figure III.14 : la variation de la température des différents composants du distillateur en juin

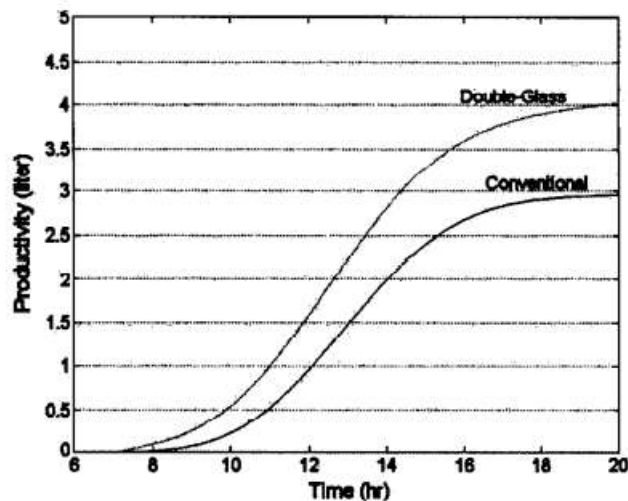


Figure III.15 : Productivité cumulée des distillateurs pour le mois de juin

Les chercheurs dans cette expérience ont établi que différents températures les ingrédients sont encore élevés le jour et faibles le soir ou pendant les périodes de faible rayonnement, ce qui est en fait prévu.

En outre, la plage des valeurs de températures est compatible avec résultats empiriques rapportées dans la littérature et nous observons aussi cela niveaux d'eau distillée produits par les deux plans solaires également comparaison positive avec les résultats d'études antérieures les performances de leur modèle sont donc satisfaisants.

III.3.4. Conclusion

Dans cette étude la modélisation d'un distillateur solaire avec eau de refroidissement s'écoulant entre un double vitrage couverture a été réalisée. Les comptes modèles pour les capacités thermiques des éléments immobiles.

Le distillateur solaire à verre unique (conventionnel) était également modélisé à des fins de comparaison. Comparatif l'analyse des performances a été menée sous les conditions climatiques de Mascate, Oman. Écoulement eau de refroidissement entre le couvercle en double verre augmentation de la productivité solaire encore. Les résultats montrés que la performance relative des distillateurs dépend du niveau d'isolation utilisé. Pour parfaitement isolés, le solaire classique donne encore un rendement plus élevé, tandis que le double verre donne un rendement plus élevé lorsqu'une valeur raisonnable pour les pertes de chaleur du bassin à l'environnement est dans la simulation.

Les évaluations paramétriques du solaire à double vitrage montrent toujours que effets du débit d'eau de refroidissement et de l'espacement de verre sur la productivité sont faible.

Chapitre IV :
Etude expérimentale
sur le
dimensionnement d'un
distillateur solaire

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons mener une étude expérimentale, afin de déterminer les dimensions (surface) d'un distillateur solaire simple, permettant de produire une quantité nécessaire d'eau distillée, qui sera utilisée pour produire de l'hydrogène à travers l'électrolyseur, solaire dans la région d'Ouargla,

Premièrement en trouvant la productivité journalière de l'eau distillée à l'aide d'un simple distillateur solaire dont les dimensions sont connues, après cela on calcule la surface requise par la règle de trois

Ce travail a été réalisé dans le laboratoire de thermodynamique fondamentale de la Faculté des Sciences de la Matière de l'Université de Ouargla.

IV.2. Matériels et méthodes

IV.2.1. Présentation de la région d'étude "Ouargla"

La ville d'Ouargla est située à 141 m d'altitude, sous un angle de 31,95 N de latitude et 5,40' de longitude E. Généralement, cette zone a un potentiel énergétique important ou l'intensité moyenne sur une surface horizontale est de 2260 kWh/m², équivalent à environ 3400 heures d'ensoleillement par an et un potentiel hydrique de 6,7 milliards m³ d'eaux souterraines.

Ces potentialités importantes peuvent probablement être mieux exploitées et développées par les concepts et méthodes de distillation solaire, Les avantages de la distillation solaire pour la région d'Ouargla sont les suivants :

- Une forte intensité des rayons solaires ;
- Une moyenne élevée de la température ambiante ;
- Une longue durée d'ensoleillement quotidien ;
- Un grand nombre de jours clairs le long de l'année.

IV.2.2. Matériel et équipements utilisés dans les expériences de distillation

IV.2.2.1. Un distillateur simple à pente unique

Le distillateur solaire unique utilisé dans notre expérience dispose d'une chambre vitrée fermée placée de manière réfléchissante, afin que l'eau distillée soit extraite de l'eau ordinaire sous l'influence du soleil.

(a) La plaque noire :

Le rôle de la plaque est d'absorber le plus possible du rayonnement solaire qui transfère la chaleur générée par cette absorption à l'eau ajoutée. C'est pourquoi il a été peint en noir. Le bac absorbant utilisé dans notre expérience est de dimension 40×80 cm et de superficie de 0.32 m².

(b) La vitre :

La matière utilisée est du verre ordinaire en raison de son relativement faible coût, sa bonne conductivité thermique, transmission du rayonnement visible et sa mouillabilité. L'étanchéité entre la couverture et les autres composants est assurée par la silicone.

(c) L'isolation thermique :

La couche isolante du distillateur utilisé est en polystyrène. L'épaisseur est de 3 cm pour une bonne transmission et afin de réduire la perte d'énergie.

(d) Couverture extérieure :

Le coffre du distillateur renferme les différents éléments actifs. Il devra donc assurer une protection efficace aux agents atmosphériques. Le coffre du distillateur est réalisé en bois.

IV.2.2.2. Les tuyaux

Les tuyauteries Ce sont des tubes en plastique, de 15 mm de diamètre, pour assurer le raccordement des différents constituants et pour le transport de l'eau.

IV.2.2.3. Une Bouteille de récupération du distillat

Nous avons utilisé des bouteilles en plastique pour la récupération du distillat, la quantité récupérée est ensuite mesurée par une éprouvette graduée.

IV.2.3. Les Instruments de mesure utilisés dans l'expérience

IV.2.3.1. Instrument de Mesure de la température (thermocouples)

Thermomètre numérique portable pour thermocouples NiCr-Ni avec prise type K. l'affichage de la température commutable entre °C et °F.

La mesure est assurée par deux appareils de mesure (PHYWE et SANDBERGER) pour diminuer l'incertitude de mesure.



Figure IV.1 : les Instruments de Mesure de la température (thermocouples).

IV.2.3.2. Instrument de mesure du rayonnement solaire global (Polarimètre)

Un Polarimètre est un type de dispositif de mesure utilisé pour mesurer l'intensité de rayonnement solaire direct et diffus combiné.

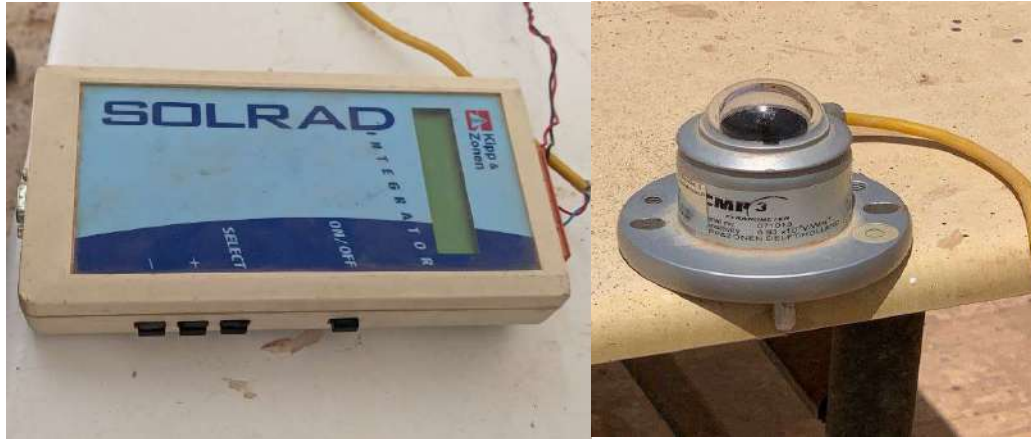


Figure IV.2 : le Polarimètre

IV.2.3.3. Appareil de mesure de la température ambiante

Pour raison de l'indisponibilité de l'appareil de mesure de la température ambiante on a utilisé une application de météo sur le Smartphone pour déterminer la température ambiante à chaque heure.

Time	Conditions		Comfort				
	Temp	Weather	Wind	Humidity	Barometer	Viability	
08:00	25 °C	Sunny	No wind	↓ 22%	1017 mbar	16 km	
09:00	30 °C	Sunny	7 km/h	↓ 14%	1018 mbar	16 km	
10:00	35 °C	Sunny	No wind	↓ 11%	1018 mbar	16 km	
11:00	36 °C	Sunny	7 km/h	↗ N/A	1016 mbar	16 km	
12:00	37 °C	Sunny	7 km/h	↘ N/A	1017 mbar	16 km	
13:00	38 °C	Sunny	7 km/h	↗ N/A	1017 mbar	16 km	
14:00	39 °C	Sunny	7 km/h	↘ N/A	1016 mbar	16 km	
15:00	39 °C	Sunny	6 km/h	↘ N/A	1015 mbar	16 km	
16:00	39 °C	Sunny	7 km/h	↗ N/A	1014 mbar	16 km	
17:00	39 °C	Sunny	6 km/h	↘ N/A	1014 mbar	16 km	
18:00	38 °C	Sunny	No wind	↓ N/A	1014 mbar	16 km	
19:00	38 °C	Sunny	No wind	↓ N/A	1014 mbar	16 km	
20:00	35 °C	Clear	No wind	↓ N/A	1014 mbar	16 km	

Figure IV.3 : l'interface de l'application "time-and-date" utilisé dans notre étude.

IV.2.3.4. Éprouvette Graduée

Un cylindre de mesure de 500 ml a été utilisé pour la mesure de la quantité de l'eau distillée obtenue pendant chaque heure.



Figure IV.4 : éprouvette de mesure de la quantité d'eau distillée.

IV.2.4. Méthodologie de travail

IV.2.4.1. Le protocole expérimental

Dans toutes les séries d'expériences nous avons utilisé 2.4 litres de l'eau de robinet sur la surface de bassin dans l'absorbeur, l'augmentation de la température due à l'effet de serre fait réchauffer l'air au-dessus de l'eau de robinet qui s'évapore. Cette capacité d'évaporation grandit au fur et à mesure que la température augmente jusqu'à ce que l'air s'atteigne sa saturation en vapeur d'eau : l'humidité relative est alors de 100%. La vapeur d'eau que contient l'air chaud est refroidie par versement de l'eau froide sur les vitres manuellement ; ce qui engendre sa condensation au vitrage.

Les gouttes d'eau formés qui s'écoulent à la partie inférieure du vitrage mis en pente dans une gouttière qui la conduit à une bouteille de stockage.

Durant cette expérience nous avons mesuré la quantité d'eau distillée produite par le distillateur dans une période de trois jours.



Figure IV.5 : refroidissement manuel du vitrage.

IV.2.4.2. Les grandeurs mesurées pendant l'expérience

Au cours de cette expérience, nous avons mesuré les grandeurs citées ci-dessous ; chaque heure de 10 :00 à 17 :00 pour les journées de 15, 16,17/05/2022 :

- Rayonnement solaire globale ;
- Les températures relatives aux descriptions des phénomènes physiques régissant le distillateur solaire : la température de face intérieure de vitre et la température intérieure de l'absorbeur ;
- La température ambiante ;
- De débit horaire du distillat.

IV.2.4.3. L'emplacement des thermocouples

L'essentiel de la mesure des températures a été assuré pour les points matériels suivants :

- La température de face intérieure de vitre $T(vtr)$;
- La température intérieure de l'absorbeur $T(abs)$.

On note que-il été difficile de placé les thermocouples d'une manière pour permettre mesurer la température d'eau et la température intérieur de l'absorbeur séparément, pour ce raison, ces deux dernier ont été considéré égale.

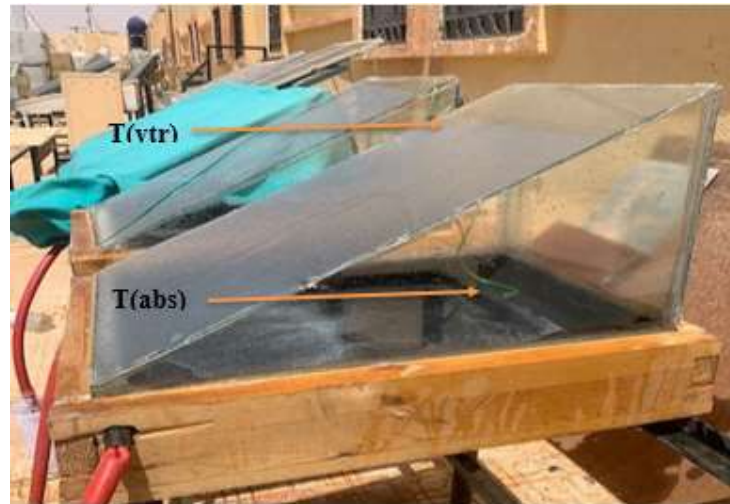


Figure IV.6 : L'emplacement des thermocouples.

IV.2.4.4. Quelques contraintes rencontrés sur le terrain :

Le tableau IV.4 représente quelques contraintes rencontrées sur le terrain :

Tableau IV.4 : Quelques contraintes rencontrés sur le terrain

Type de contrainte	Contrainte	Conséquences	Solutions
Technique	Manque de l'appareil de mesure de température ambiante.	Manque des données nécessaires	Nous avons utilisé une application mobile de météo.
	Difficulté de placé les thermocouples d'une manière pour permettre mesurer la température d'eau.		Nous avons supposé que la température d'eau est égale à la température d'absorbeur
	Au troisième jour, le polarimètre il n'était pas disponible.		L'ensoleillement de 3ème jour n'était pas inclus dans les résultats
	La déposition de la poussière sur la vitre	Réduire l'efficacité d'évaporation	Nettoyage fréquent de la vitre
	Précipitation de dépôts de calcaire sure l'absorbeur		Brosser l'absorbeur, avant de faire l'expérience
	Les fuites fréquentes		Nous utilisons la silicone pour assurer l'étanchéité.

Climatique	la période dans laquelle nous avons effectué les expériences, la température était élevée	La difficulté de faire les expériences	/
	L'intermittence des nuages qui réduit l'ensoleillement	Réduire l'efficacité d'évaporation	Nous avons choisi des jours de fort ensoleillement

IV.3. Résultats et discussion :

IV.3.1. Présentation des résultats obtenus expérimentalement

IV.3.1.1. La variation du rayonnement solaire et la température ambiante en fonction du temps

D'une manière générale, la température augmente de la même tendance que le rayonnement solaire, ce dernier atteint sa valeur maximale jusqu'à 610 w/m² dans la période de l'après-midi entre 13hr.00 et 14hr.00. La température ambiante peut atteindre jusqu'à 39°C entre 14h.00 et 15hr.00.

On note que le distillateur ne fonctionne dans la période de 8 :00 à 17 :00 heures à cause de faible intensité solaire hors cette période.

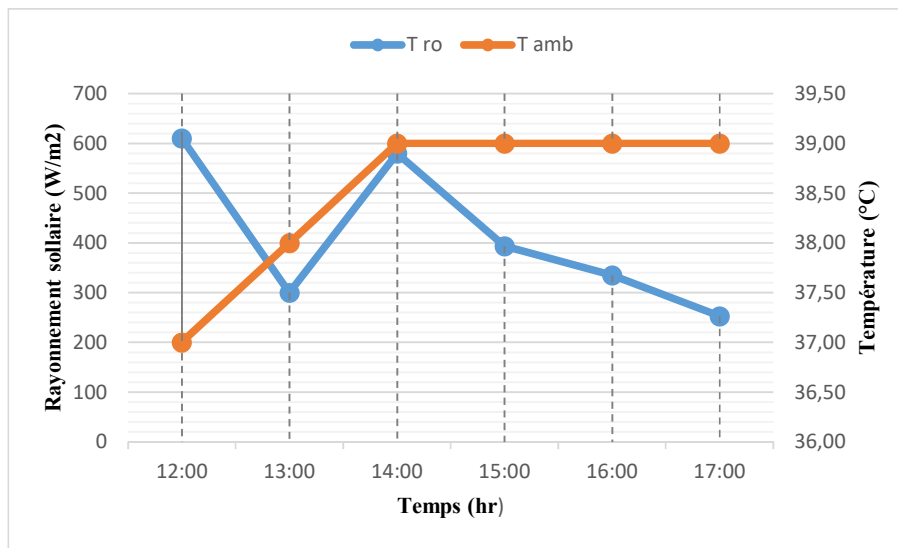


Figure IV.7 : Courbe de l'intensité solaire et la température ambiante de la journée 15-05-2022.

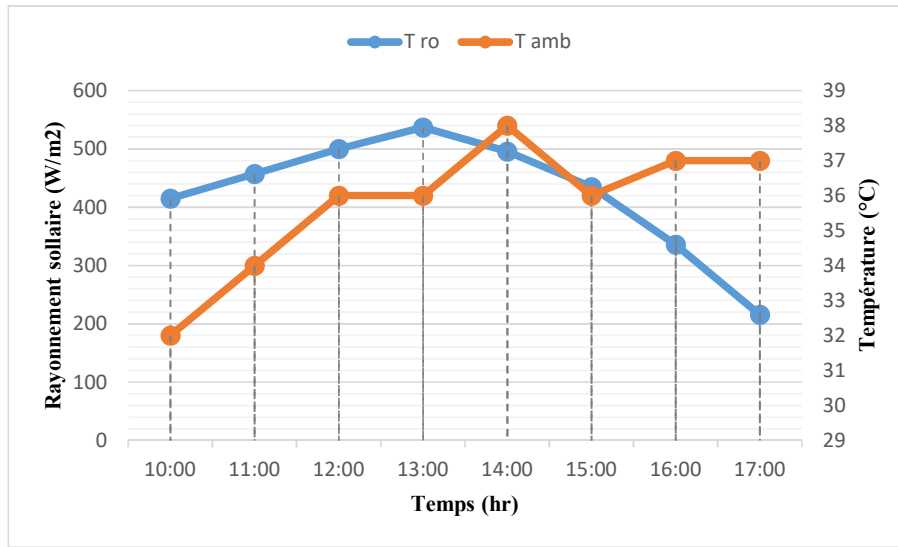


Figure IV.8 : Courbe de l'intensité solaire et la température ambiante de la journée 16-05-2022.

IV.3.1.2. La variation de différentes températures en fonction du temps

La température du vitrage et de l'absorbeur est de la même allure, mais la température de ce dernier est toujours supérieure à celle de vitre pour avoir une condensation de vapeur.

La température dans le réservoir est toujours supérieure à la température ambiante à cause de l'effet de serre à l'intérieur du distillateur.

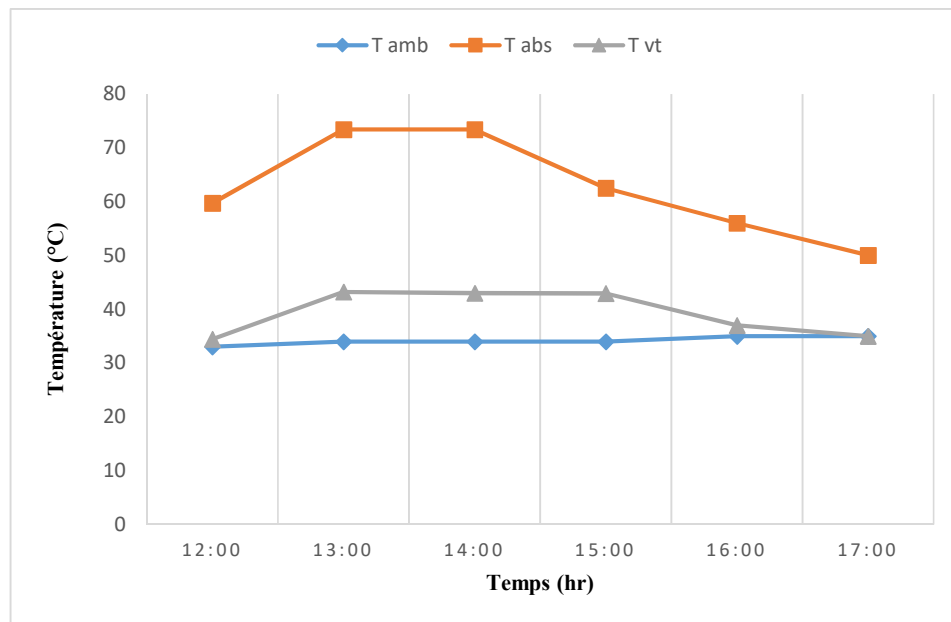


Figure IV.9 :L'évolution des températures en fonction du temps de la journée 15-05-2022

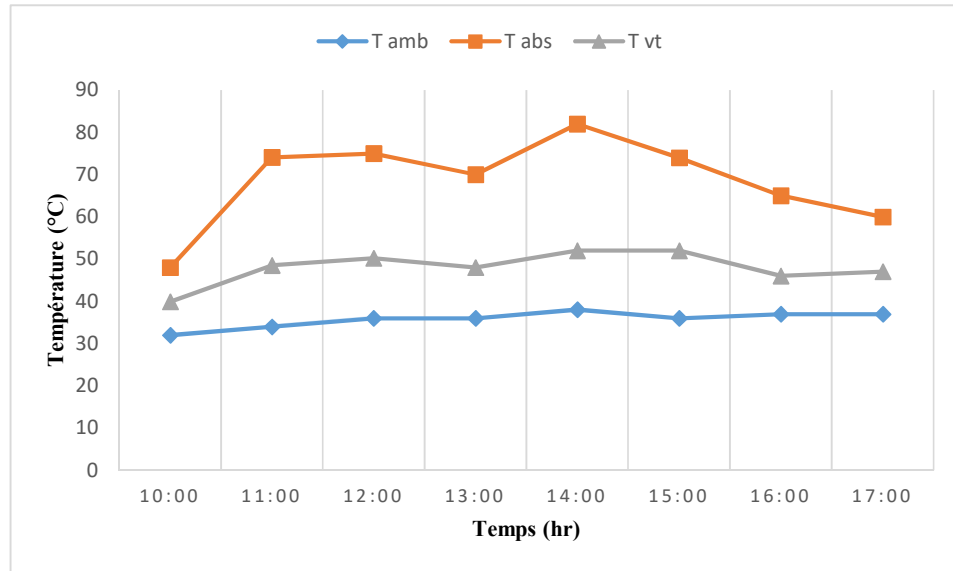


Figure IV.10 :L'évolution des températures en fonction du temps de la journée 16-05-2022

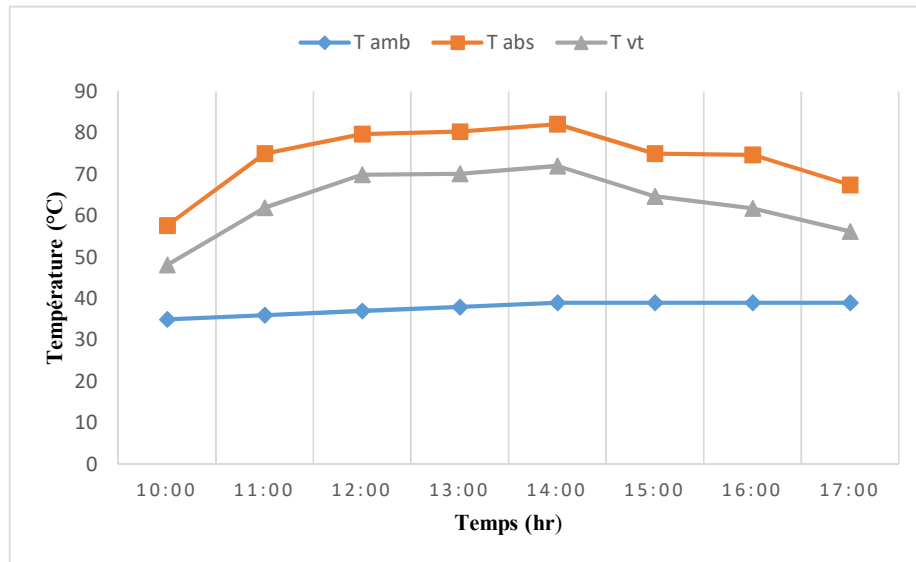


Figure IV.11 :L'évolution des températures en fonction du temps de la journée 17-05-2022

IV.3.1.3.Variations de la quantité d'eau distillée en fonction du temps

➤ Journée de 15-05-2022 :

Dans la première journée, la condensation de l'eau est visible sur la vitre dès 11hr.30, des gouttes se formaient sur les faces intérieures de la vitre, descendant par gravité jusqu'à la bouteille de condensation.

La quantité produit dépend étroitement de la quantité de chaleur qu'il reçoit, la figure ci-dessous montre une fluctuation de la production, le volume de l'eau distillé diminue à une valeur minimale de 30 mL à 14hr.00 à cause de faible irradiation solaire dans cette période (nuage qui passent).

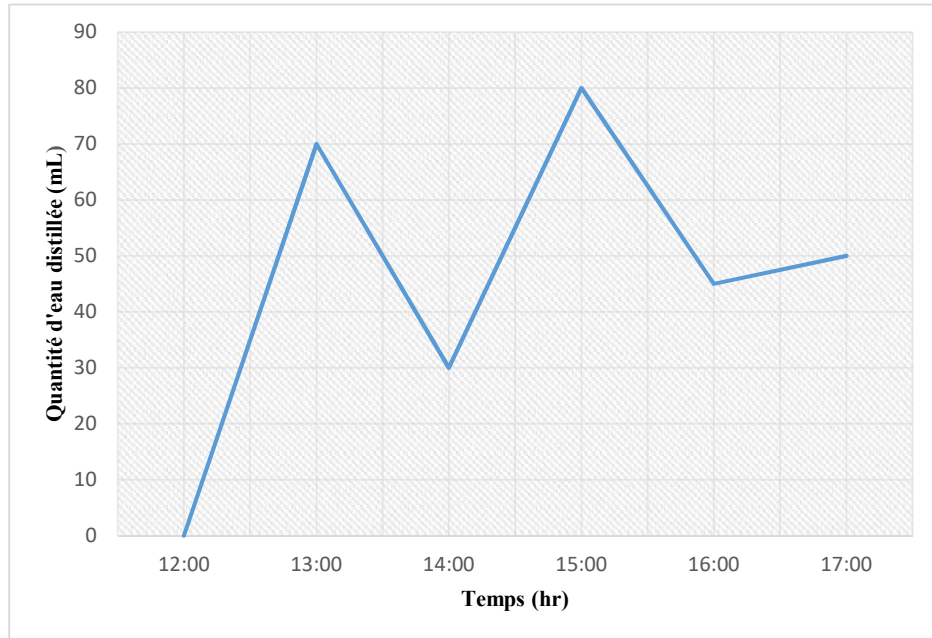


Figure IV.12 : Volume d'eau distillé produit en fonction du temps

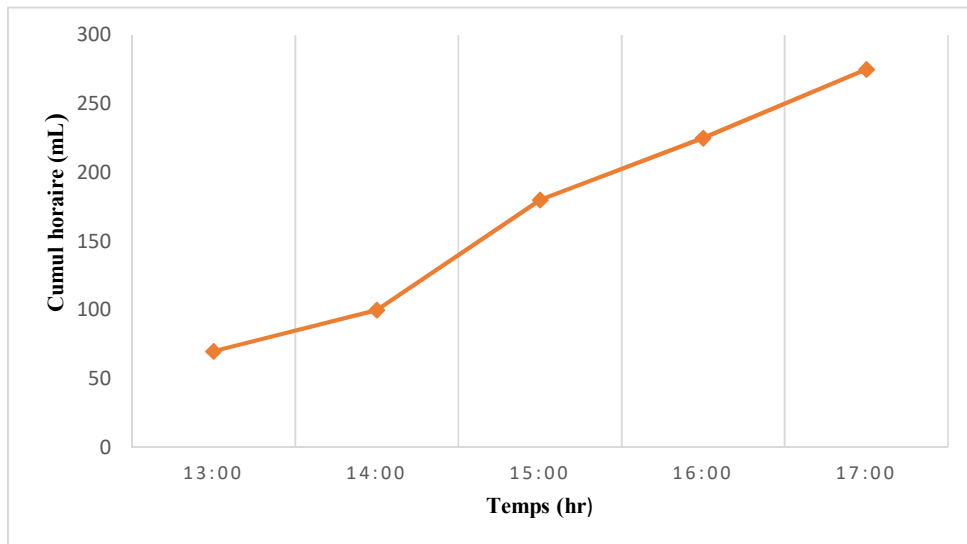


Figure IV.13 : Cumul horaire

➤ **Journée de 16-05-2022 :**

Pour la 2^{ème} journée, la production d'eau distillé varie en fonction de l'horaire jusqu'à une valeur maximale vers 14 et 15 heures, car en effet, l'intensité du flux solaire évolue de la même manière, la production diminue ensuite rapidement.

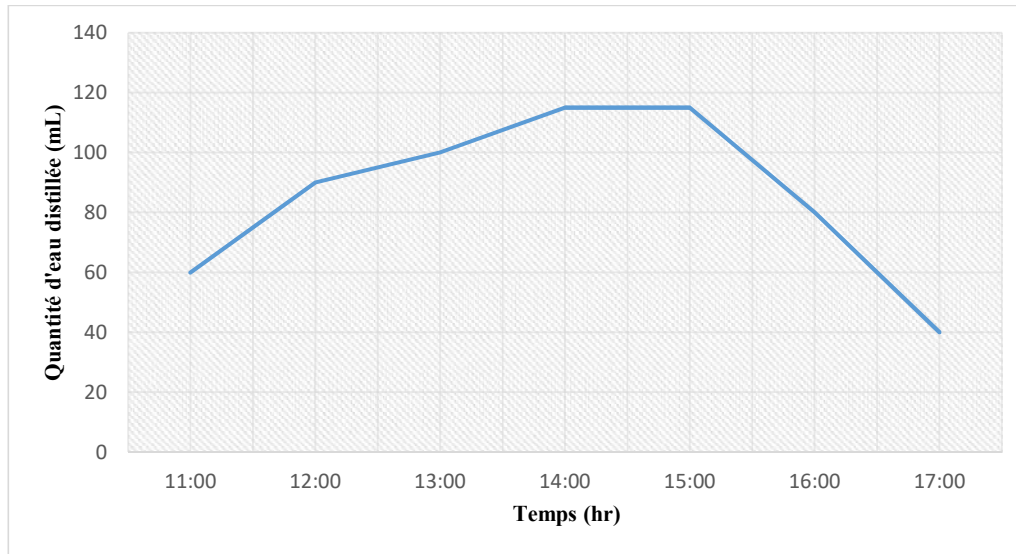


Figure IV.14 : Volume d'eau distillé produit en fonction du temps

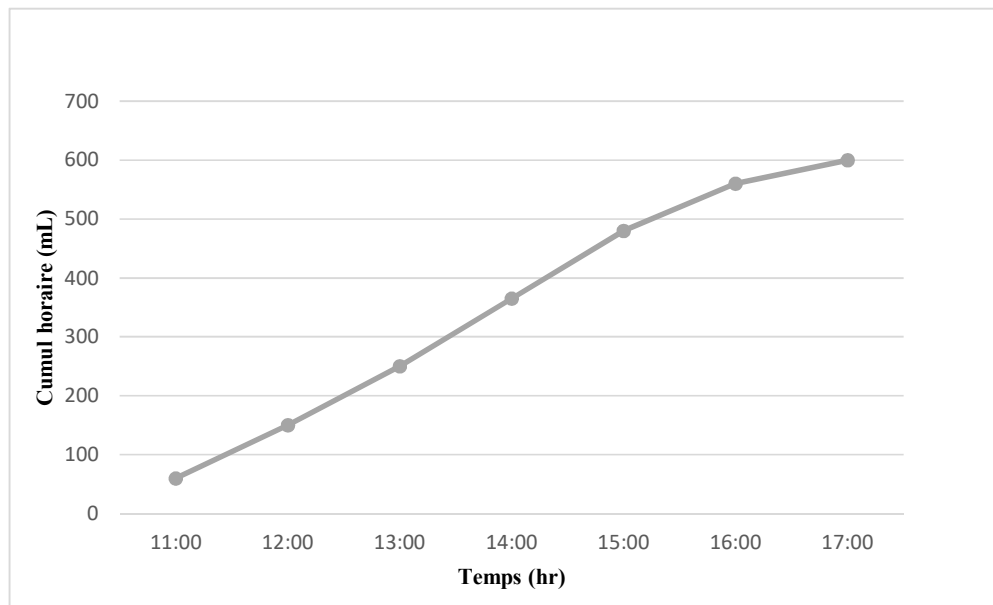


Figure IV.15 : Cumul horaire.

➤ **Journée de 17-05-2022 :**

Dans le dernier jour, la production d'eau distillé varie en fonction de l'horaire jusqu'à une valeur maximale vers 14 heures, la production diminue ensuite rapidement.

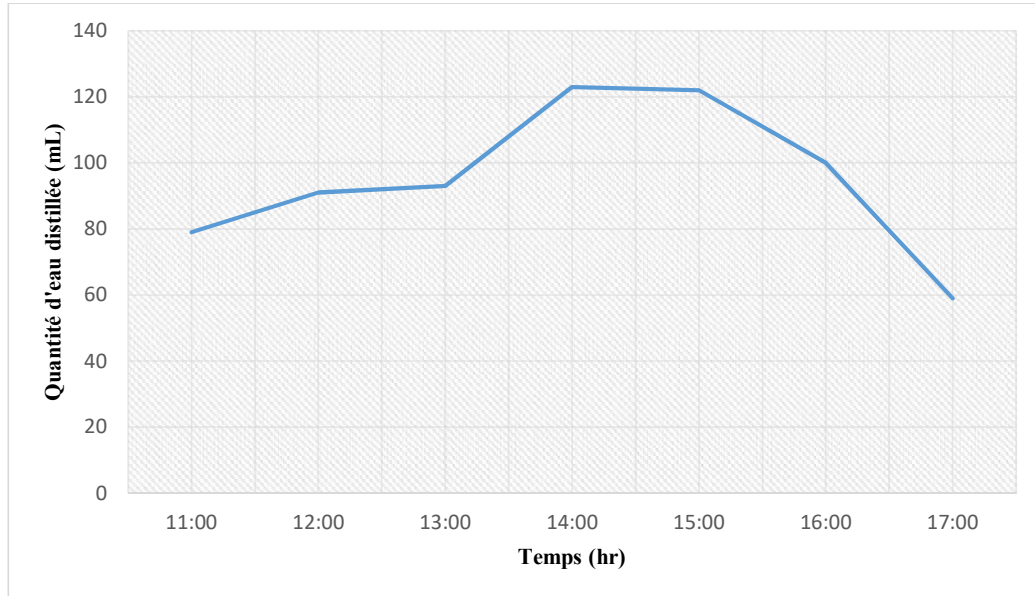


Figure IV.16 : Volume d'eau distillé produit en fonction du temps

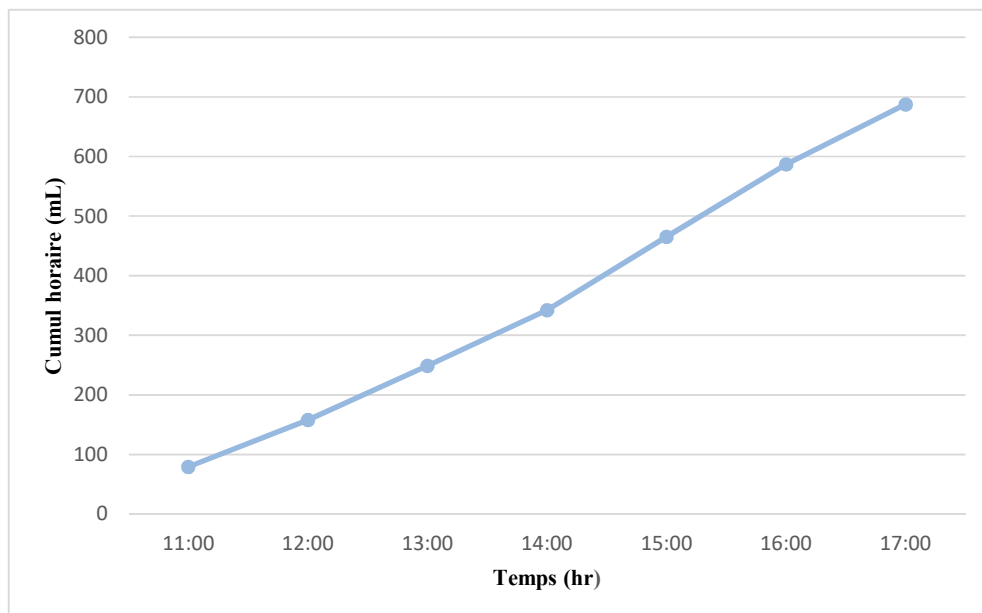


Figure IV.17 : Cumul horaire.

IV.3.1.4. Comparaison des débits moyens au cours des jours de l'expérience

Comme montre la figure ci-dessous le débit de l'eau produit augmente en fonction de la température et l'ensoleillement, la productivité atteint sa pique dans le 3ème jour (qui correspond à la température la plus élevée) avec un débit moyen de 95.2 ml/hr et volume cumulé de 687 ml.

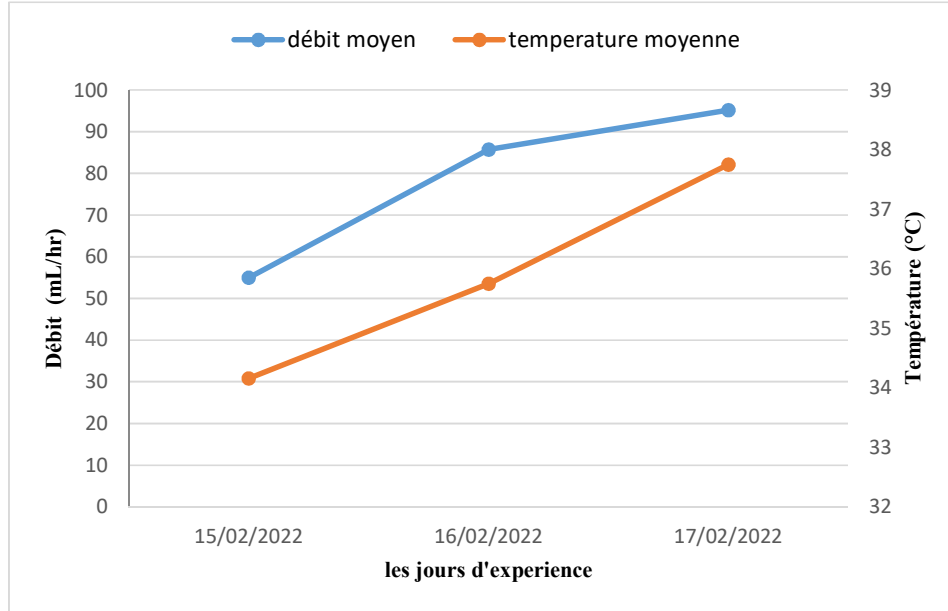


Figure IV.18 : Débits moyens et température en fonction du temps.

IV.3.2. Exploitation et discussion des résultats

IV.3.2.1. Les Résultats

Comme mentionné dans l'introduction de ce chapitre, l'objectif principal de ce travail est d'atteindre les dimensions d'un distillateur solaire simple, pouvant produire 1000 litre d'eaux distillées par jour.

A travers les résultats que nous avons obtenus lors de notre travail expérimental, qui est représenté dans 687 ml d'eau distillée par jour, moyennant d'un distillateur solaire simple d'une superficie de 0.32 m²

Donc et par l'application de la règle trois, on trouve la surface de cette distillateur égal à :

$$\text{Surface nécessaire} = 465,8 \text{ m}$$

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de ce travail, nous résumons ici les principaux résultats obtenus :

- Le rayonnement solaire est considéré le paramètre clé pour la production de l'eau distillée et les températures de tous les composants du distillateur, puisque ces deux derniers ont la même tendance que la variation de rayonnement.
- La production d'un distillateur dépend étroitement de la quantité de chaleur qu'il reçoit, et dépend du gradient de température qui existe entre la température de l'eau et de l'absorbeur et la température extérieure du vitrage, ce gradient est créé par versement manuelle de l'eau froide.
- La production du distillateur augmente en fonction de l'horaire jusqu'à une valeur maximale vers 14 :00 à 15 :00 heures, ensuite elle diminue en fonction de l'horaire.
- A fin de produire 1 000 litre d'eaux distillées par jour, la surface du distillateur nécessaire est de 465,8 m.

Référence bibliographique

Références bibliographiques

- [1] Mosseri, R., & Jeandel, C. (2013). L'énergie à découvert. Cnrs.
- [2] Rousseau, I. (2018). Les bus à moteur électrique alimenté par pile à combustible à hydrogène. Etude de la mise en place d'un réseau sur la ville de Liège et en Wallonie.
- [3] Ayodele, T. R., & Munda, J. L. (2019). Potential and economic viability of green hydrogen production by water electrolysis using wind energy resources in South Africa. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(33), 17669-17687.
- [4] Denis, J. B. (2016). Étude de l'influence d'éléments d'addition sur les propriétés de stockage de l'hydrogène dans le système Ti-V-Fe (Doctoral dissertation, Paris Est).
- [5] Al Bacha, S. (2020). Générateur d'Hydrogène «vert» pour mobilité légère ou de courte distance (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux, Université libanaise).
- [6] Matthes, C., Aruffo, V., & Retby-Pradeau, L. (2020). The Risks and Opportunities of Green Hydrogen Production and Export From the MENA Region to Europe. *Dii Desert Energy*.
- [7] DEBROISE, A. (2021). Énergie : les clés pour comprendre les couleurs de l'hydrogène. *Science & Vie*, 50, 1250.
- [8] Moumén, B. Mouhamed, L., Doudi, T. (2018) Etude de la Nature d'Eau d'El Oued sur l'Electrolyse. (Mémoire master, université de l'oued).
- [9] Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and sustainable energy reviews*, 67, 597-611.
- [10] Abad, A. V., & Dodds, P. E. (2020). Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. *Energy Policy*, 138, 111300.
- [11] ALLEAU, T. (2004). Mémento de l'hydrogène, fiche 5.2.3 ; 5.2.4 ; 5.2.5 ; 5.2.6. Association Française de l'Hydrogène.
- [12] Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International journal of hydrogen energy*, 40(34), 11094-11111.

- [13] Martinez-Burgos, W. J., de Souza Candeo, E., Medeiros, A. B. P., de Carvalho, J. C., de Andrade Tanobe, V. O., Soccol, C. R., & Sydney, E. B. (2021). Hydrogen: Current advances and patented technologies of its renewable production. *Journal of Cleaner Production*, 286, 124970.
- [14] Zhang, B., Zhang, S. X., Yao, R., Wu, Y. H., & Qiu, J. S. (2021). Progress and prospects of hydrogen production: Opportunities and challenges. *Journal of Electronic Science and Technology*, 19(2), 100080.
- [15] Manish, S., & Banerjee, R. (2008). Comparison of biohydrogen production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(1), 279-286.
- [16] Adessi, A., & Philippis, R. D. (2012). Hydrogen production: photofermentation. In *Microbial technologies in advanced biofuels production* (pp. 53-75). Springer, Boston, MA.
- [17] Das, D., & Veziroğlu, T. N. (2001). Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. *International journal of hydrogen energy*, 26(1), 13-28.
- [18] Kalamaras, C. M., & Efstathiou, A. M. (2013). Hydrogen production technologies: current state and future developments. In *Conference papers in science* (Vol. 2013). Hindawi.
- [19] Ahmed, T. Y., Ahmad, M. M., Yusup, S., Inayat, A., & Khan, Z. (2012). Mathematical and computational approaches for design of biomass gasification for hydrogen production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2304-2315.
- [20] Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in energy and combustion science*, 31(2), 171-192.
- [21] Baldissarelli, V. Z., Benetoli, L. O. D. B., Cassini, F. A., Souza, I. G. D., & Debacher, N. A. (2014). Plasma-assisted production of carbon black and carbon nanotubes from methane by thermal plasma reform. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 25, 126-132.
- [22] Ulejczyk, B., Nogal, Ł., Młotek, M., & Krawczyk, K. (2022). Efficient Plasma Technology for the Production of Green Hydrogen from Ethanol and Water. *Energies*, 15(8), 2777.

- [23] Benoît, C. (2021). Produire de l'hydrogène sans CO₂ : Sakowin y parvient grâce au plasma et à partir de méthane
- [24] Charis, S. (2021). Transformer les déchets en hydrogène : la gazéification plasma.
- [25] Agyekum, E. B., Nutakor, C., Agwa, A. M., & Kamel, S. (2022). A critical review of renewable hydrogen production methods: factors affecting their scale-up and its role in future energy generation. *Membranes*, 12(2), 173.
- [26] Hamidatou, T., Khennour, S. (2018). Etude d'un système de pile à combustible alimenté par hydrogène solaire photovoltaïque (Mémoire master, Ouargla, Université de Kasdi Merbah).
- [27] Labbé, J. (2006). L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés (Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris).
- [28] Rallières, O. (2011). Modélisation et caractérisation de Piles A Combustible et Electrolyseurs PEM (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT).
- [29] Boualati, Y. (2004). Investigation sur la performance d'un distillateur solaire (Doctoral dissertation, Ouargla, Université de Kasdi Merbah. Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingenieur).
- [30] Robert, F., Majidet, G., Alma, C. (2000). *Solar energy: Renewable energy and the environment*, CRC press Taylor et Francis, New York, USA.
- [31] Bouchaib, S. (2013). Présentation de nouvelles cartes solaires algériennes, Journée du Solstice d'été, CDER.
- [32] Ahmed, Z. (2011). Étude et conception d'un distillateur solaire à effet de serre. (Mémoire de magistère en Physique Nucléaire, Physique Théorique et Physique Appliquée), université d'Antananarivo, 4(08).
- [33] Menina, R., Ben Moussa, H., Zemmouri, L., Moussaoui, A. Etude Expérimentale de l'Effet du Préchauffage sur la Productivité d'un Distillateur Solaire *Rev. Energ. Ren.*, Journées de Thermique (2001) 145-150.

- [34] Maurel, A. (2001). Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. Éditions Tec & Doc.
- [35] Chaker, A., Bellel, N., & Menguy, G. (2003). Pertes thermiques dans un distillateur sphérique. *Revue Internationale D'Héliothermie*, (28).
- [36] Boukar, M., Harmim, A., & Amar, M. (2006). Construction et expérimentation d'un distillateur solaire vertical indirect à simple effet. *Revue des Energies Renouvelable ICRES-07 Tlemcen2007*.
- [37] Sadi, A. (2000). Le Dessalement Solaire-Considérations Techniques. Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzareah. Alger, rapport.
- [38] Bernard, R. (1979). G. menguy, M. Schwartz. Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications. *Technique et Documentation*.
- [39] Ghoneyem, A., & Ileri, A. (1997). Software to analyze solar stills and an experimental study on the effects of the cover. *Desalination*, 114(1), 37-44.
- [40] Nafey, A. S., Abdelkader, M., Abdelmotalip, A., & Mabrouk, A. A. (2000). Parameters affecting solar still productivity. *Energy conversion and management*, 41(16), 1797-1809.
- [41] Bouchekima, B., Gros, B., Ouahes, R., & Diboun, M. (2000). Etude théorique et application pratique du distillateur solaire à film capillaire. *International journal of thermal sciences*, 39(3), 442-459.
- [42] Zayouti, E., Bouirden, L., Haroune, A. A., & Banoumi, M. (2002). Distillation solaire : Amélioration de la condensation de la vapeur d'eau dans les distillateurs solaires. In *International Forum on Renewable Energies*, Agadir, Maroc.
- [43] site web: <http://www.hqe.guidenr.fr/cible-4-hqe/differentes-technologies-electrolyseur.php>
- [43] Xu, X., & Bi, L. (2020). Proton-conducting electrolyte materials. In *Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells* (pp. 81-111). Elsevier.
- [44] Site web: <http://www.hqe.guidenr.fr/cible-10-hqe/position-geometrique-soleil.php>
- [45] Yaiche, M. R., & Bouhanik, A. (2002). Atlas solaire algérien. Portail des Energies Renouvelables, Centre de Développement des Energies Renouvelables, 16.
- [46] Site web: https://www.wikidebrouillard.org/wiki/Effet_de_serre.

[47] Benbekht, M. (2013) étude de la distillation des eaux saumâtres par énergie solaire. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.

[48] Guitoubi, F., & Bouras, A. (2017). L'influence d'un capteur solaire sur le procédé de la distillation solaire à simple effet.

[49] Brahim, L., Chouchene, S. Fabrication et Expérimentation d'un Distillateur solaire sphérique.

[50] Site web: <http://www.gem.es/MATERIEL/DOCU>

[51] Abdenebi, H., Moussa, P. H. B. Etude d'un système de dessalement solaire à étages multiples avec récupération de la chaleur. Article, le 2ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, Ghardaïa–Algérie, 15, 16.

Résumé :

Dans le présent travail nous avons effectué une analyse bibliographique et une étude expérimentale au niveau de la station des énergies renouvelable d'UKMO afin de dimensionner un distillateur solaire pour alimenter un électrolyseur de production d'hydrogène vert. Un distillateur solaire simple a été utilisé dans notre travail, le débit de eau distillé produit, le rayonnement solaire et les différents températures des composants du distillateur ont été enregistré chaque une heure dans la période de trois jours. L'interprétation des courbes de rayonnement solaire et les différents températures en fonction du temps montre que ils ont la même tendance et que La production de l'eau distillé éteint son pique autour 14hr00 à 15hr00.

Mots-clés : Solaire thermique, production d'hydrogène, l'hydrogène vert, distillateur solaire, électrolyseur.

Abstract:

In the present work, we have carried out a literature review and an experimental study at the UKMO Renewable Energy Station in order to design a solar distiller to supply an electrolyser for green hydrogen production. A simple solar distiller was used in our work where the flow rate of the produced distilled water, the amount of solar radiation and the different temperatures of the distiller components were monitored hourly over a three-day period. The interpretation of the solar radiation curves and the different temperatures as a function of time shows that they have the same trend and that the production of distilled water reaches its peak around 14hr00 to 15hr00.

Keywords: Solar thermal, hydrogen production, green hydrogen, solar distiller, electrolyser.

المخلص:

في هذا العمل، أجرينا تحليلاً بيليوغرافياً ودراسة تجريبية أو على مستوى محطة الطاقة المتجددة UKMO من أجل تحجيم مقطر شمسي لتشغيل محلل كهربائي من أجل إنتاج الهيدروجين الأخضر. تم استخدام مقطر شمسي بسيط في عملنا، وتم تسجيل معدل تدفق المياه المقطرة المنتجة، والإشعاع الشمسي ودرجات الحرارة المختلفة لمكونات المقطر كل ساعة في فترة ممتدة لثلاثة أيام. يُظهر تفسير منحنيات الإشعاع الشمسي ودرجات الحرارة المختلفة بدالة الوقت أن لديهم نفس التوجه وأن إنتاج المياه المقطرة يصل ذروته حوالي 14-15 ساعة.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية الحرارية، إنتاج الهيدروجين، الهيدروجين الأخضر، المقطر الشمسي، المحلل الكهربائي