



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Kasdi Merbah – Ouargla
Faculté des sciences Appliquées
Département Génie Mécanique



Mémoire
Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Thème

Présenté et soutenu publiquement par :

ABID ZINEB

KADRI NOUR ELHOUDA

Soutenue le : 12 /06 /2024

**Estimation le potentiel de production de l'hydrogène vert
par l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque au niveau des
stations de dessalement d'eau de mer (SDEM) en Algérie**

Devant Le Jury :

Mr. Charad noureddine	Pr	Univ. Kasdi Merbah Ouargla	Examineur
M ^{me} . Ghdamssi Rebha	MCB	Univ. Kasdi Merbah Ouargla	Président
M ^{me} . Rahmouni Soumia	MCB	Univ. Kasdi Merbah Ouargla	Encadreur

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2023/2024

Résumé

L'Algérie a souffert de pénuries d'eau et d'une demande accrue d'énergie, ce qui pèse sur les ressources naturelles et menace la durabilité environnementale. Cette étude vise à évaluer le potentiel de la production d'hydrogène vert utilisant l'énergie solaire photovoltaïque dans les stations de dessalement de l'eau de mer comme solution durable à ces défis. Pour atteindre cet objectif, l'étude s'est appuyée sur l'étude des trois stations typiques de dessalement d'eau de mer. Une installation de production d'hydrogène a été conçue, comprenant des panneaux solaires, un convertisseur, un électrolyseur et un système d'osmose inverse. Le système a ensuite été modélisé à l'aide d'outils spécialisés (PV/Elec/SDEM) et les besoins en énergie ont été déterminés. Les résultats ont été analysés en détail avec une discussion sur la relation entre la capacité de la station de dessalement et sa production d'hydrogène vert, la consommation d'énergie de l'électrolyseur et de la station de dessalement, ainsi que le superficie du champ solaire dans la détermination de la quantité d'énergie produite.

Mots clés

Hydrogène vert, Énergie solaire photovoltaïque, Dessalement de l'eau de mer, Algérie

الملخص

عرضت الجزائر لنقص في المياه وزيادة في الطلب على الطاقة، مما يضغط على الموارد الطبيعية ويهدد الاستدامة البيئية. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم إمكانية إنتاج الهيدروجين الأخضر باستخدام الطاقة الشمسية الفوتوفولطائية في محطات تحلية مياه البحر كحلا مستداماً لهذه التحديات. لتحقيق هذا الهدف، استندت الدراسة إلى دراسة ثلاث محطات نموذجية لتحلية مياه البحر. تم تصميم مرفق إنتاج الهيدروجين، بما في ذلك الألواح الشمسية، ومحول الطاقة، وجهاز التحليل الكهربائي، ونظام وتحديد احتياجات الطاقة. (PV/Elec/SDEM) التناضح العكسي. تم بعد ذلك نمذجة النظام باستخدام أدوات متخصصة تم تحليل النتائج بتفصيل مع مناقشة حول العلاقة بين قدرة محطة التحلية وإنتاج الهيدروجين الأخضر، واستهلاك الطاقة لجهاز التحليل الكهربائي ومحطة التحلية، بالإضافة إلى مساحة الحقل الشمسي في تحديد كمية الطاقة المنتجة.

الكلمات الرئيسية

هيدروجين أخضر، طاقة شمسية كهروضوئية، تحلية مياه البحر، الجزائر

DÉDICACE

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers

A la femme qui a fait de moi une fille ambitieuse et aimant les défis, mon premier modèle auprès de qui j'ai appris la force et la confiance en soi, dont la satisfaction crée la réussite pour moi **ma Mère**, que Dieu prolonge ta vie.

A ce grand homme qui a fait ressortir ce qu'il y avait de plus beau en moi et m'a toujours encouragé à atteindre mes ambitions, et qui a fait tout ce qu'il pouvait et ne s'est pas retenu **mon père**. Que Dieu te garde comme notre ombre.

A ceux avec qui Dieu m'a béni pour que je connaisse à travers eux le goût d'une belle vie et les notions d'amour et d'amitié, mes frères **Mohammed, Bouthayna, Amir et Amira**

A ma deuxième mère, cette grande femme dont les prières m'ont toujours accompagné tout au long de mon parcours universitaire **ma grand-mère** Que Dieu bénisse votre vie pour nous.

A qui je suis fier d'être sa petite-fille **mon grand-père**, que Dieu prolonge ta vie

A celles qui furent mon refuge après ma mère, mes tantes **faiza, rabiia, madiha**
Surtout ma tante **faiza**, elle était mon soutien constant qui ne se fatiguait ni ne s'inclinait

A ceux qui m'ont soutenu et soutenu après mon père, mes oncles **Hocine, Hamza, Mohammed, Nabil, Abdelhakim, Ali**

A cette femme que les mots et les sentiments ne peuvent décrire et qui n'est qu'un baume au cœur, la femme de mon oncle **kaouther**

A mon cher Binôme Et mon compagnon sur le sentier **Zaineb**

A ce bijou que vous m'avez donné ma sœur **Ibtissem**

A tous ceux qui m'ont encouragé et m'ont aidé à achever mon mémoire.

k. Nourelhouda

DÉDICACE

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers

A la femme qui a fait de moi une fille ambitieuse et aimant les défis, mon premier modèle auprès de qui j'ai appris la force et la confiance en soi, dont la satisfaction crée la réussite pour moi **ma Mère** que Dieu prolonge ta vie.

A ce grand homme qui a fait ressortir ce qu'il y avait de plus beau en moi et m'a toujours encouragé à atteindre mes ambitions, et qui a fait tout ce qu'il pouvait et ne s'est pas retenu **mon père** Que Dieu te garde comme notre ombre.

A ceux avec qui Dieu m'a béni pour que je connaisse à travers eux le goût d'une belle vie et les notions d'amour et d'amitié, mes frères **Dr.Abd el Rahman, Mourad, Aicha, oulaya, Imad, halima, Mohammed Tidjani, Laid, Mouath**

A ma deuxième mère, cette grande femme dont les prières m'ont toujours accompagné tout au long de mon parcours universitaire **ma grand-mère** Que Dieu bénisse votre vie pour nous.

A qui je suis fier d'être sa petite-fille **mon grand-père**, Que Dieu lui fasse miséricorde

A les enfants de ma famille

ismail, ishak, silouan, bissan, nayara, amir, amira, rayan, naser, rital

A mon cher Binôme Et mon compagnon sur le sentier **Nourelhouda**
À mes amis **manar, hayat, miyyada, fatma, soumia, chaima, Amal**(Dieu repose son âme)

A tous ceux qui m'ont encouragé et m'ont aidé à achever mon mémoire.

A.zineb

REMERCIEMENTS

Dieu, le Tout-Puissant, le Miséricordieux, le Clément,

Source de force et de courage,

Je dédie ce modeste travail en signe de gratitude infinie pour Ses bénédictions qui m'ont permis de persévérer et d'accomplir cette recherche.

À ma directrice de mimor,

Mme. Rahmouni Soumia,

Chef du Département de génie mécanique à l'Université Kasdi Merbah,

J'exprime ma profonde reconnaissance pour son encadrement précieux, ses conseils avisés et son soutien indéfectible tout au long de mon parcours doctoral. Sa confiance en mes capacités m'a motivé à repousser mes limites et à viser l'excellence.

Aux membres du jury,

M. CharadNour Eddine et Mme. GhdamssiRebha,

Je suis reconnaissant de l'honneur que vous m'avez fait en acceptant d'évaluer mon travail de thèse. Votre expertise et vos remarques constructives ont contribué à améliorer la qualité de cette recherche.

Sommaire

Nomenclature	I
Liste Des Figures	II
Liste Des Tableaux	Iv
Introduction Générale	1

Chapitre 1: Generalites

1.	Introduction	2
2.	Generalites Hydrogène	2
2.1.	Caractéristiques de l'hydrogène	2
2.2.	Principaux modes de Production d'hydrogène	4
2.2.1.	Production de l'hydrogène par de Fossile	4
2.2.1.1.	Reformage a la Vapeur	4
2.2.1.2.	Oxydation partielle catalytique	5
2.2.1.3.	Reformage autotherm	6
2.2.2.	Production de l'hydrogène par les énergies renouvelables	6
2.2.2.1.	Production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau	6
2.2.2.2.	Production de l'hydrogène par biomasse	9
2.3.	Stockage de l'hydrogène	9
2.3.1.	Stockage gazeux	10
2.3.2.	Stockage liquide	11
2.3.3.	Stockage solide	12
2.4.	Transport et distribution	13
2.4.1.	Transport par canalisation	13
2.4.2.	Transport ferroviaire	13
2.4.3.	Transport maritime	14
2.4.4.	Transport routier	15
2.5.	Application de l'hydrogène	15
2.5.1.	Industrie chimique et pétrochimique	16
2.5.2.	Hydrogène comme vecteur énergétique	16
2.5.2.1.	Application stationnaire	16
2.5.2.2.	Application mobile	16

3.	Generalites Dessalement de l'eau de mer	17
3.1.	Définition du dessalement de l'eau de mer	17
3.2.	Schéma général d'une installation de dessalement	17
3.2.1.	Alimentation en eau de mer	18
3.2.2.	Prétraitement	18
3.2.3.	Installation de dessalement	18
3.2.4.	Post-Traitement	18
3.3.	Différents procédés de dessalement	19
3.3.1.	Procédés de dessalement par changement de phase	20
3.3.2.	Procédés membranaires	25
3.3.3.	Les Procédés chimiques	26
4.	Conclusion	26

Chapiter2 : Production d'hydrogène Dans l'Algérie

1.	Introduction	27
2.	Potentialités de l'algérien	27
2.1.	Potentiel d'énergie renouvelable	27
2.1.1.	Potentiel solaire	27
2.1.2.	Potentiel éolien	28
2.1.3.	Potentiel hydrique	29
2.2.	Gaz naturel	30
3.	Feuille de route pour la mise en Œuvre de la stratégie de développement de l'hydrogène	31
3.1	Déploiement de la filière hydrogène	31
4.	Conclusion	34

Chapiter3 : Estimation Du Potentiel De Product Ion d'hydrogene

1.	Introduction	35
2.	Dessalement de l'eau en Algérie	35
3.	Conception d'Installation de production d'hydrogène	37
3.1.	Champ photovoltaïque PV	39
3.2.	Conversion du courant continu (Cc) en courant alternatif (Ca)	39
3.3.	Electrolyseur	39

3.2	Station de dessalement	39
3.2.5.	System de stockage d'énergie	39
4	Modélisation énergétique (PV/ SDEM)	40
4.1.	Modélisation énergétique de l'électrolyseur	40
4.2.	Modélisation des modules photovoltaïques	40
4.3.	Surface Totale de Générateur photovoltaïque	41
4.4.	Détermination du nombre de modules a Installé	42
4.5.	Energie électrique consommée par SDEM	42
5.	Résultats et discussions	45
5.1.	Système PV alimente seulement l'électrolyseur	45
5.2.	Système PV alimente La SDEM et l'électrolyseur	48
6.	Conclusion	50
	Conclusion Générale	51
	Bibliographie	53
	Annexes	56

Nomenclature

A	Surface des modules	m^2
A_{PV}	Surface totale de générateur photovoltaïque	m^2
E_{ele}	Energie absorbée par l'électrolyseur	kWh/jour
E_{pv}	Energie électrique photovoltaïque	kWh/jour
El	Electrolyseur	-
H_2	Hydrogène	-
GHI	Irradiation solaire globale sur un plan horizontal	kWh/m ² /jour
M_{H_2}	Quantité d'hydrogène	Kg/jour
N_{PV}	Nombre des panneaux solaires nécessaire à l'installation	-
PCI_{H_2}	Pouvoir calorifique supérieur d'hydrogène	KWh/Kg
PV	Photovoltaïque	-
SDEM	Station dessalement de l'eau de mer	-
SWRO	Sea water reverse osmosis	-

Lettres grecques

η_{ele}	Rendement d'électrolyseur	%
η_p	Le rendement supplémentaire qui est inclut pour tenir compte des pertes d'énergie dans l'électrolyseur	%
η_{pv}	Rendement de générateur photovoltaïque	%

LISTE DES FIGURES

Fig.1.1 : Production d'hydrogène par vapo-reformage	5
Fig.1.2 : Relation entre Energie renouvelable et l'hydrogène	7
Fig.1.3 : Principe de l'électrolyse alcaline	8
Fig.1.4 : L'électrolyse PEM	9
Fig.1.5 : L'électrolyse SOFC	10
Fig.1.6 : Station-service cryogénique Linde	13
Fig.1.7 : Ariane 5, étage cryogénique	13
Fig.1.8 : Réservoir cryogénique (ou cryostat) développé par Magna Steyr	13
Fig.1.9 : Développement du stockage solide depuis 50ans	14
Fig.1.10 : Grande échelle d'hydrogène transporté par les chemins de fer	16
Fig.1.11 : Kawasaki conception de l'industrie lourde pour les transporteurs d'hydrogène liquide	17
Fig.1.12 : Types de transport routier : (a) camions citernes, (b) remorques à tubes	18
Fig.1.13 : Schéma général d'une installation de dessalement	20
Fig.1.14 : Les procédés de dessalement	23
Fig.1.15 : Principe de distillation	24
Fig.1.16 : Schéma d'une distillation à simple effet	25
Fig.1.17 : Distillation à multiple effet	26
Fig.1.18 : Principe de fonctionnement d'un système par détente successives (MSF) étages	27
Fig.1.19 : Schéma de principe d'une unité d'évaporation avec Compression de Vapeur	28
Fig.1.20 : Principe de dessalement par l'électrodialyse	31
Fig.2.1 : Potentiel d'hydrogène solaire	28
Fig.2.2 : Potentiel d'hydrogène éolien	29
Fig.2.3 : Potentiel hydrique	31
Fig.2.4 : réseau gazoduc	32
Fig.3.1 : Situation géographique des stations de dessalement en Algérie	36
Fig.3.2 : Schéma de principe de fonctionnement de l'installation de production de l'hydrogène (PV/SDEM)	38
Fig.3.3 : Répartition des ressources de consommation énergétique dans une norme SWRO Processus	44

Fig.3.4 : Organigramme de dimensionnement	45
Fig.3.5 : la quantité d'hydrogène produite quotidiennement et la capacité de production de trois types de stations	47
Fig.3.6 : Energie absorbée par l'électrolyseur et Energie électrique photovoltaïque de trois types de stations	48
Fig.3.7 : Superficie totale du générateur PV montre de trois types de stations	49
Fig.3.8 : énergie éclectique PV et énergie PV total et la différence entre eux de trois types de stations	51
Fig.3.9:Surface total du générateur de trois types de stations	52

Liste des tableaux

Tab1.1	Caractéristiques de l'hydrogène	2
Tab1.2	Les différents types de réservoirs gazeux	12
Tab1.3	Les différents groupes de stockage solide	14
Tab3.1	Principales usines de dessalement d'eau de mer	37
Tab3.2	Principales caractéristiques des électrolytes	40
Tab3.3	caractéristiques de monocristallin 72 cellules 320 WC	42
Tab3.4	Irradiation solaire globale sur un plan horizontal	42
Tab3.5	Exportations la capacité et a quantité d'hydrogéné dans stations Mestghanem	45
Tab3.6	Exportations énergie absorbée par l'électrolyseur et énergie PV et énergie absorbée par l'électrolyseur et énergie PV dans stations Mestghanem	46
Tab3.7	Exportations Surface totale du générateur PV dans stations Mostaganem	48
Tab3.8	Exportations Energie photovoltaïque total Énergie électrique photovoltaïque et la différence entre eux	49

Introduction générale

L'Algérie utilise le dessalement de l'eau de mer pour répondre à la demande croissante en eau, mais cela génère également des quantités importantes d'eau salée condensée qui menacent l'environnement marin. Le pays est également confronté à une crise énergétique en raison de sa dépendance aux combustibles fossiles, ce qui rend la recherche de sources d'énergie propres et durables cruciale pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et garantir la sécurité énergétique.

L'hydrogène se présente comme une solution prometteuse à ces deux défis. Sa production à partir d'une énergie renouvelable propre tel que l'énergie solaire, et l'eau dessalée, offre de nombreux avantages à savoir ; la valorisation de l'eau salée condensée au lieu de polluer la mer, cette eau est utilisée pour la production d'hydrogène, la production d'une énergie propre qui ne génère aucune émission de gaz à effet de serre lors de son utilisation, et la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles dans de nombreux secteurs [1].

Pour améliorer sa sécurité énergétique le gouvernement Algérien a lancé plusieurs projets de production d'hydrogène solaire à partir du dessalement de l'eau de mer car le pays dispose d'un long littoral méditerranéen, et des ressources solaires abondantes [2].

L'objectif de ce travail est d'estimer le potentiel de production de l'hydrogène vert par l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque au niveau des stations de dessalement d'eau de mer (SDEM) en Algérie. Le travail comporte trois chapitres, Ce travail sera conclu par une conclusion générale et quelques perspectives.

Le premier chapitre intitulé : présente un panorama général du hydrogène tout en précisant ses différents modes de production, de stockage, de transport et ces application. et en deuxième lieu, nous présenterons le dessalement de l'eau de mer et ses différents procédés

Le deuxième chapitre : nous présenterons Potentialités du algérien (solaire, éolien, hydrique, gaz Natural) et Déploiement de la filière hydrogène.

Le troisième chapitre : nous présenterons les usines de dessalement de l'eau de mer du L'Algérie et une Conception d'installation de production d'hydrogène et puis nous l'avons fait une Modélisation énergétique (PV/ SDEM) Puis nous avons vu l'organigramme de calcul Ensuite, nous avons étudié et discuté les résultats.

**CHAPITRE 1: GENERALITES SUR
L'HYDROGENE ET LE
DESSALEMENT D'EAU DE MER**

1. INTRODUCTION

L'Algérie, pays au climat aride et semi-aride, fait face à un défi majeur la rareté de l'eau potable. Face à une population croissante et à une demande en eau toujours plus importante, le dessalement d'eau de mer s'impose comme une solution prometteuse pour garantir l'accès à cette ressource vitale.

L'hydrogène vert est une source d'énergie propre et renouvelable qui peut être utilisée pour produire de l'électricité et alimenter les stations de dessalement sans émissions de carbone et Combiner le dessalement de l'eau de mer avec la production d'hydrogène vert peut offrir une solution durable aux défis de l'eau et de l'énergie en Algérie.

Dans ce chapitre, en premier lieu, nous présenterons des généralités sur l'hydrogène tout en précisant ses différents modes de production, de stockage, de transport et ces application . et en deuxième lieu , nous présenterons des généralités sur le dessalement de l'eau de mer et ses différents procédés

2. Généralités l'hydrogène

2.1. Caractéristiques de l'hydrogène

L'hydrogène, premier élément du tableau périodique, possède des propriétés spécifiques. Voici quelques fonctionnalités importantes

Les caractéristiques physico-chimiques de l'hydrogène sont reprises dans le Tableau 1 :

Tab1.1 : Caractéristiques de l'hydrogène [3].

Propriété	Valeurnumérique
Pci (pouvoir calorifique inférieur)m ³	33.33KWh/kg
Pcs (pouvoir calorifique supérieur : inclut l'énergie la vapeur d'eau)	39.41kwh/kg
Densité gazeuse à 20.3k	0.8988kg/Nm ³ (gaz naturel 0.6512kg/Nm ³)
Densité gazeuse à 273k	7079 kg/m ³

Chaleur spécifique (Cp)	14266J/kg k(293k)
Chaleur spécifique(Cv)	10 300J/kg k
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/(mk)
Chaleur d' evaporation	445.4kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14112J/g (3.92kwh/kg)
Electronegativity (Pauling)	2.1
Masse atomique	1.0079
Constant du gaz	4124.5J/kg k
Temperature de solidification	14.01k
Temperature ebullition (1013 mbar abc)	20.268k
Temperature critique	33.30k
Temperature d'autoinflammation dans l'air	858k(gaz naturel 813k)
Temperature de flamme dans l'air à 300k	2318k(gaz naturel 2148k)
Limites d'inflammabilité dans (vol%)	4-75(gaz naturel 5.3-15)
Limites de détonation dans l'air (vol%)	13-65(gaz naturel 6.3-13.5)
Energie minimale d'inflammation(J)	20(gaz naturel 290)
Energie explosive théorique(kg de TNT/m de gaz)	2.02(gaz naturel 7.03 bar)
Suppression de détonation(mélange stœchiométrie)	14.7 bar(gaz naturel 16.8bar)
Coefficient de diffusion dans 'air	0.61 cm /s (gaz naturel 0.16)
Vitesse de flamme dans l'air	260cm/s(7 fois le gaz naturel)
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 km/s(gaz naturel 1.8km/s)
Mélange stœchiométrie dans l'air(vol)	29.53%(gaz naturel 9.48%)

2.2. Principaux modes de production d'hydrogène

2.2.1. Production de l'hydrogène par de fossile

La production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles est une technologie mature et économique, mais elle n'est pas compatible avec les objectifs de décarbonations. Des alternatives plus durables, comme l'électrolyse avec de l'électricité renouvelable, doivent être développées et mises à l'échelle pour répondre aux besoins futurs en hydrogène.

2.2.1.1.Reformage à la vapeur

Méthode la plus répandue, il s'agit d'une réaction endothermique, c'est-à-dire nécessitant un apport de chaleur, entre un hydrocarbure et l'eau. Cette réaction est catalysée par du Nickel.



Le produit de réaction est un gaz, mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone appelé gaz de synthèse. Une seconde réaction a lieu afin d'augmenter la concentration en hydrogène. Cette réaction s'appelle réaction de conversion à l'eau.



Cette étape de production est légèrement exothermique mais la chaleur dégagée n'est pas suffisante pour entretenir la réaction de reformage [4].

Globalement, le bilan [5] des deux réactions est endothermique. Le mélange gazeux à la sortie de réacteur est approximativement composé de 70% hydrogène ,25% CO₂ ,4% méthane et moins de 1% de CO. La troisième étape consiste à séparer ces gaz. Le procédé industriel le plus utilisé c'est l'adsorption du CO₂ sur charbon actif, permettent d'obtenir de l'hydrogène pur à 99.99% environ.

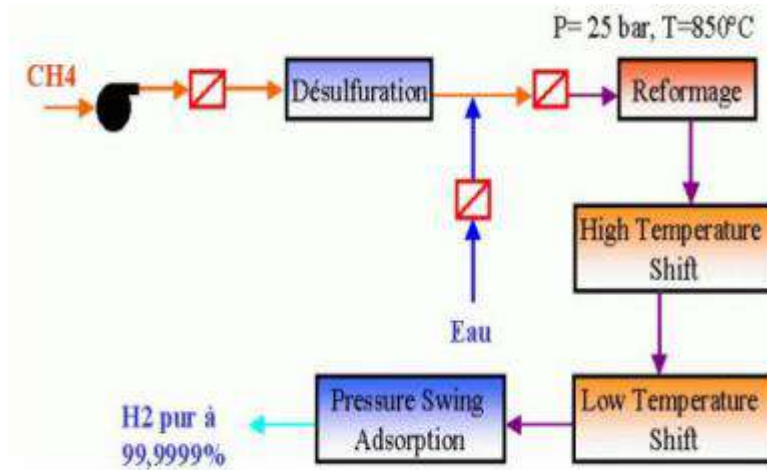
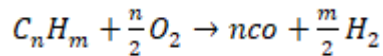


Fig.1.1 : Production d'hydrogène par vapo-reformage[5]

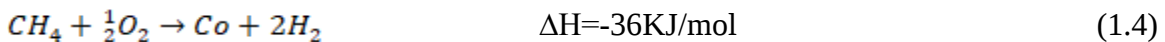
2.2.1.2. Oxydation partielle catalytique

L'oxydation partielle consiste à produire de l'hydrogène à partir du méthane du gaz naturel qu'on fait réagir avec de l'oxygène. Cette réaction s'effectue à de hautes températures (1300 à 1400 °C) et à des pressions plus ou moins importantes (20 à 90 bar)

Equation générale de l'oxydation partielle :



(1.3) Equation avec le méthane:



La réaction conduit à la formation du monoxyde de carbone, ce qui nécessite, tout comme dans la production d'hydrogène par vaporeformage, une phase de décarbonatation « Water Gas Shift »



Le bilan donne une réaction globale exothermique:



Et en fin, on procède à la purification de l'hydrogène produit. Ce type de réaction pourrait s'avérer très intéressant dans l'optique de la production d'hydrogène embarquée sur les véhicules automobiles fonctionnant grâce à des piles à combustible [6].

2.2.1.3. Reformage autotherme

Le procédé autotherme de reformage auto thermique est probablement la plus intéressante des prochaines évolutions des procédés de production d'hydrogène à partir des hydrocarbures son principal atout est de compenser (dans un même réacteur à lit fixe) les réactions endothermiques du vaporeformage par les réactions exothermiques de l'oxydation partielle [6].

2.2.2. Production de l'hydrogène par les énergies renouvelables

La production d'hydrogène par les énergies renouvelables est une technologie prometteuse qui a le potentiel de jouer un rôle majeur dans la transition vers un avenir énergétique propre et durable.

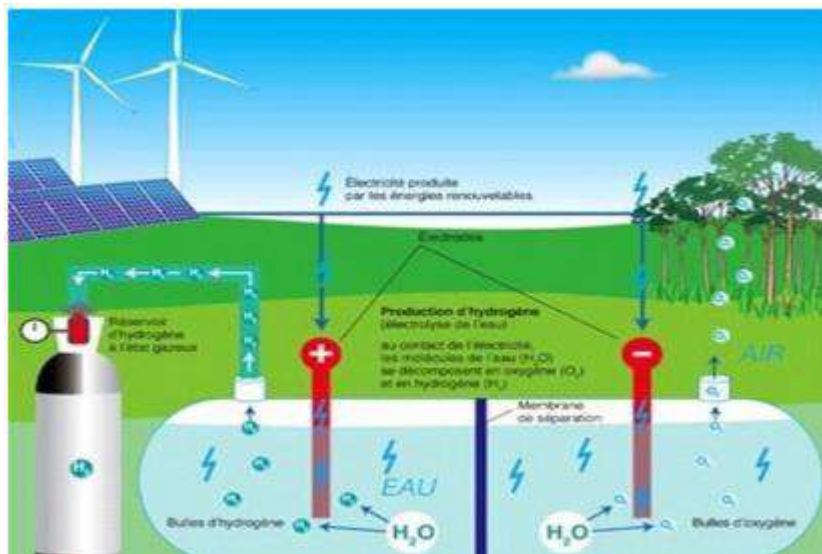


Fig1.2: Relation entre Energie renouvelable et l'hydrogène [5] .

2.2.2.1. Production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau

L'électrolyse est le procédé de décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène par passage d'un courant électrique entre deux électrodes immergées dans un électrolyte aqueux. L'hydrogène produit est plus pur que celui produit par vaporeformage facilitant son usage dans les piles à combustible (PAC). L'énergie requise est typiquement de l'ordre de 50 kWh électrique par kilogramme d'hydrogène produit (cas d'un rendement de 66 %) [7].

a. Électrolyse alcaline

Une solution alcaline à base de potasse est utilisée. Cette technique est robuste, mature et éprouvée. Les avis sur le potentiel d'amélioration sont divers, certains voyant le Capex être divisé par deux, trois ou cinq (effet de taille, grandes séries), d'autres pensant que l'optimum est atteint. Les systèmes sont lourds ce qui limite la montée en puissance. La densité de courant est faible et le système réagit mal à l'intermittence [7] en raison d'une capacité restreinte de modulation en puissance, même si des recherches sont en cours pour améliorer ce point. La corrosion due à l'électrolyte induit des frais d'entretien.

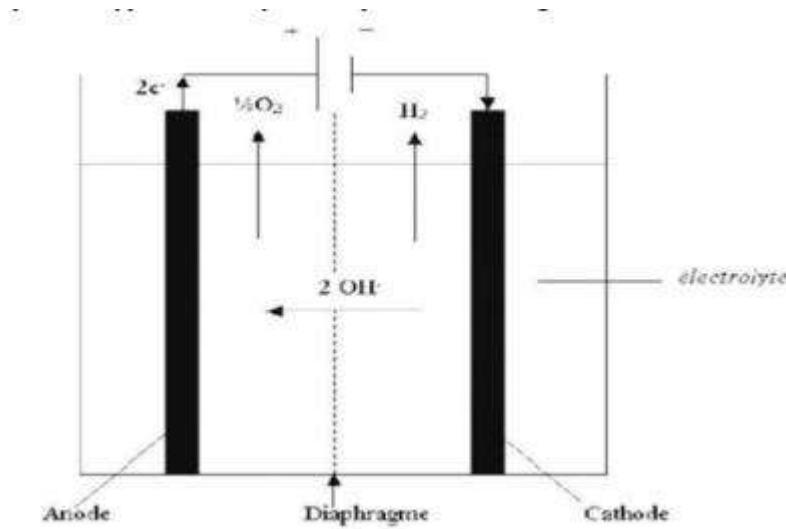


Fig.1.3: Principe de l'électrolyse alcaline [5].

b. Électrolyse PEM (Proton Exchange Membrane)

Les électrolyseurs PEM intègrent une membrane perméable aux protons. Cette membrane est habituellement composée de polymères en acide sulfonique perfluoroalkyle. Les électrodes utilisent des catalyseurs à base de métaux nobles poreux. La décomposition de l'eau en oxygène, électrons et protons est réalisée à l'anode. Les protons migrent à travers la membrane vers la cathode où ils sont réduits en molécules d'hydrogène, alors que les électrons migrent à travers le circuit externe vers la cathode pour se combiner avec les protons [3].

Afin de maintenir une bonne conductivité protonique des électrolyseurs PEM, de la vapeur saturée est nécessaire, ce qui limite la température de fonctionnement à 80°C.

Les avantages d'utiliser une membrane polymère comme électrolyte sont :

- Bonne stabilité chimique ;
- Bonne résistance mécanique ;
- Bonne conductivité protonique ;
- Bonne séparation des gaz.
- Compacité
- Simplicité du fonctionnement
- Plus sûre et peu de problèmes de corrosion.

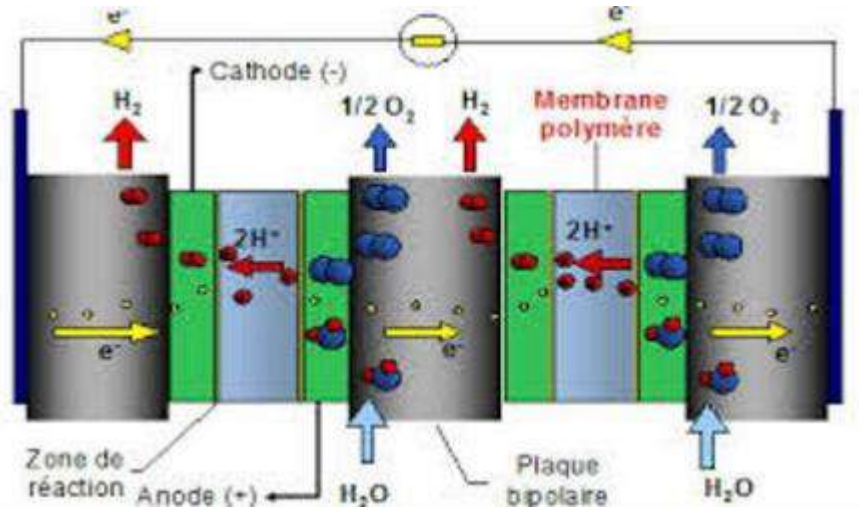


Fig.1.4: L'électrolyse PEM [5].

c. Électrolyse SOEC haute température

Le procédé fonctionne à 600-700 °C et est développé notamment au CEA. Des essais en cours visent à abaisser la température à 120-150 °C. La haute température consomme de l'énergie mais améliore la mobilité des porteurs de charge et la cinétique, abaisse les résistances, améliore la densité de courant et le rendement. Ce système présente l'intérêt d'être réversible et de pouvoir fonctionner soit comme électrolyseur, soit comme pile à combustible à oxyde solide (SOFC). Il est ainsi possible de fonctionner en mode électrolyseur lorsque le prix de l'électricité est bas, et en mode pile à combustible produisant de l'électricité lors des pics de demande électrique. Ce procédé est encore en phase de recherche [7].

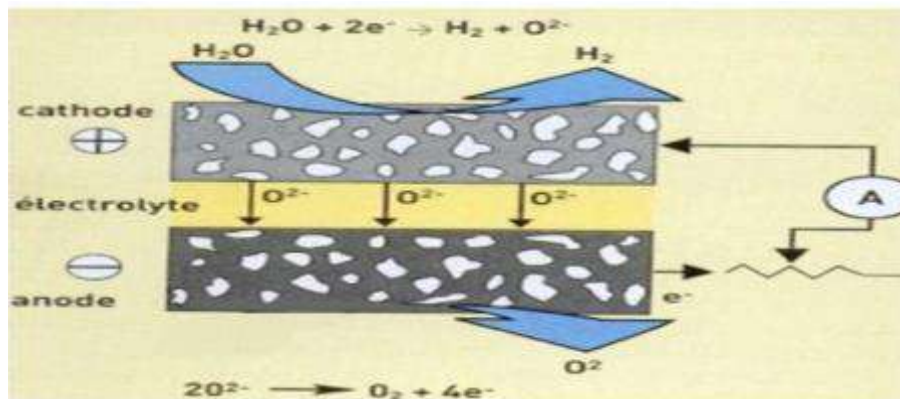


Fig.1.5: L'électrolyse SOFC[5] .

En conclusion, l'exploitation des énergies renouvelables pour produire de l'hydrogène offre une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques de demain tout en préservant l'environnement

2.2.2.2. Production de l'hydrogène par biomasse

La biomasse est constituée de tous les végétaux (bois, paille, etc.) qui se renouvellent à la surface de la Terre. Elle constitue une source potentielle importante de dihydrogène on obtient, par gazéification, un mélange ($\text{CO} + \text{H}_2$) que l'on purifie ensuite. Cette solution est attrayante car la quantité de CO_2 émise au cours de la conversion de la biomasse en hydrogène est à peu près équivalente à celle provenant de la photosynthèse ; l'écobilan est donc nul. On cherche actuellement à faire produire du dihydrogène par des micros algues ou des bactéries qui utilisent la lumière et des enzymes spécifiques : les hydrogénasses. De telles recherches sont menées sur la plate-forme Héliobiotec, au centre CEA Cadarache. Une autre voie de recherche prometteuse consiste à mimer chimiquement les réactions impliquant ces hydrogénasses, pour développer des réacteurs chimiques bio-inspirés de production de dihydrogène [8].

2.3. Stockage de l'hydrogène

L'hydrogène est difficile à stocker et à transporter, en raison de sa faible densité énergétique par unité de volume. Le transport s'effectue généralement en bouteilles ou en pipelines sous forme comprimée : le gaz peut être comprimé de quelques dizaines de bars à 350 ou 700 bars pour être acheminé. D'autre part, il est possible de le liquéfier l'hydrogène à -253°C mais cette transformation est très énergivore [9].

2.3.1. Stockage gazeux

La voie gazeuse est la plus simple et la plus répandue des technologies de stockage. L'hydrogène est contenu dans des réservoirs sous pression. Plus la pression est élevée, plus la quantité d'hydrogène stocké est grande. Les réservoirs actuellement développés fonctionnent avec des pressions maximales aux alentours de 300-350 bar (30-35 MPa) voir 480 bar. Le travail actuel consiste à créer des réservoirs gazeux sous 700 bar afin d'améliorer la capacité volumique, principal défaut de cette technologie.

Pour leur conception, les réservoirs gazeux sont regroupés sous 4 types :

Type I réservoir cylindrique en méta

Type II réservoir contenant une enveloppe de métal pour la tenue mécanique, frettée par des fibres continues imprégnées de résine.

Type III réservoir constitué d'une enveloppe de métal pour contenir l'hydrogène et d'une enveloppe de fibres continues imprégnées de résine pour la tenue mécanique.

Type IV réservoir constitué d'une [10]enveloppe non métallique pour contenir l'hydrogène et d'une enveloppe de fibres continues imprégnées de résine pour la tenue mécanique

Tab1.2: Les différents types de réservoirs gazeux

Type	I	II	III	IV
Schéma				
Réalisation				

Pour chaque type de réservoir, le choix de l'enveloppe (liner) en contact avec l'hydrogène est de première importance. Dans le cas du Type I, les contraintes mécaniques sont directement reprises par le liner ; un matériau à grande limite élastique sera donc privilégié (Acier). En revanche, dans le cas des réservoirs de type III et IV, le liner sert de barrière à hydrogène. Un matériau peu perméable à l'hydrogène sera alors préféré (Aluminium

dans le cas de type III). Largeur des fibres, motifs, angles d'enroulement et nombre de passes font partie des critères à optimiser pour l'enroulement filamentaire.

2.3.2. Stockage liquide



Fig.1.6 : Station-service cryogénique Linde cryogénique



Fig.1.7 : Ariane 5, étage cryogénique



Fig.1.8 : Réservoir cryogénique (ou cryostat) développé par Magna Steyr

Pour stocker l'hydrogène à l'état liquide, on le refroidit jusqu'à 20 K (-253 °C). La technologie est maîtrisée, notamment pour des applications spatiales (Fig. 1.7) ou de stockage stationnaire (hôpitaux, station-service). La capacité volumique est certes importante mais la très faible température reste le problème majeur de cette technologie. De plus, l'énergie de liquéfaction est élevée. Cette technologie se prête plus au stockage stationnaire pour lequel de grands moyens d'isolation thermique peuvent être mis en œuvre (Station services Air Liquide, Linde cf Fig. 1.6). En revanche,[10] dans le cas des applications mobiles où l'isolation thermique est limitée, le réchauffement du

réservoir conduit à l'évaporation de l'hydrogène qui doit alors être libéré afin de limiter la pression interne dans le réservoir. L'utilisation d'un véhicule hybride (essence/hydrogène) permet alors d'aller faire le plein d'hydrogène pour un long trajet

2.3.3. Stockage solide

Depuis les études sur le stockage solide de l'hydrogène dans le palladium, diverses familles de matériaux ont requis l'attention des scientifiques pour trouver le support le plus adapté au stockage d'hydrogène Fig. (I.9) [10].

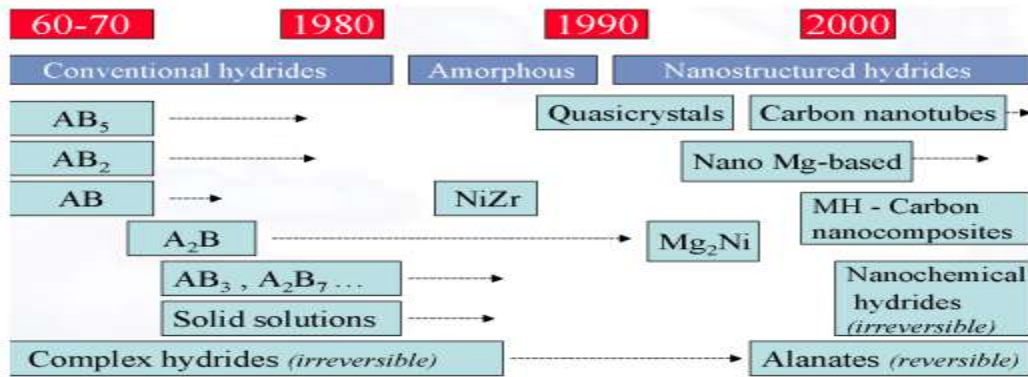


Fig. 1.9: Développement du stockage solide depuis 50 ans [10].

Tab1.3 : Les différents groupes de stockage solide

Stockage par adsorption	- charbon actif - nanotubes - nano fibre de graphite - MOFs, Zéolites,...
Hydrures chimiques (réactif avec l'eau)	- NaH encapsulé - LiH et MgH₂ - CaH₂, LiAlH₄,...
Hydrures réversible	- Alliages et composés intermétalliques - Nano cristaux - Hydrures complexes
Hydrures chimiques (thermique)	- Borozaned'ammoniac - Hydrured'aluminium

Le stockage solide semble être la voie la plus prometteuse pour l'avenir. Les capacités volumiques sont très intéressantes puisque supérieures à celles du stockage liquide [10].

2.4. Transport et distribution

Conceptuellement, le transport est divisé en deux parties qui sont la transmission et la distribution. La transmission fait référence au transport de l'hydrogène d'une usine vers d'autres régions sans unités de production et la distribution fait référence au transport de l'hydrogène vers les stations de ravitaillement à partir d'une usine ou d'un centre régional de conditionnement dans une région quelconque [11].

L'hydrogène peut être transporté sous forme de gaz ou de liquide. L'hydrogène gazeux peut être transporté par des pipelines à haute pression ou par des remorques tubulaires et l'hydrogène liquéfié peut être transporté dans des citernes

2.4.1. Transport par canalisation

Les pipelines sont fortement recommandés pour les longues distances et les grandes quantités. Ils sont utilisés depuis plusieurs années pour fournir de l'hydrogène aux raffineries et aux usines chimiques. Aujourd'hui, il y a environ 16,000 km de pipelines d'hydrogène partout dans l'Europe, Canada et les États-Unis d'Amérique. Des réseaux denses existent par exemple entre la Belgique, la France et les Pays-Bas, dans la région de la Ruhr en Allemagne, ou le long de la côte du Golfe aux États-Unis

Des pressions de fonctionnement typiques sont 1-3 MPa avec des débits de 310-8,900 kg/h. Le plus long pipeline d'hydrogène dans le monde appartient à Air Liquide et s'étend de 400 km de Picardie à la Belgique. Les États-Unis ont plus de 720 km des pipelines d'hydrogène concentrés le long du côté du Golfe et les Grands Lacs. L'option la moins chère du transport de l'hydrogène est par pipeline de grande capacité, ce qui peut coûter moins de 0,1 \$ US/kg plus de 100 km. L'estimation du coût en capital de la transmission de l'hydrogène varie de 200,000 à 1,000,000 US \$/km de canalisations. Bien sûr, leur coût peut être réduit si l'infrastructure de gaz naturel pouvait être adaptée à l'hydrogène.[11]

2.4.2. Transport ferroviaire

La distribution de l'hydrogène peut également être effectuée par des voies ferrées. Les réservoirs cryogéniques cylindriques tels que ceux utilisés pour le transport routier sont adoptés pour le transport ferroviaire. Ils ont de plus grandes capacités et peuvent transporter jusqu'à 9,100 kg d'hydrogène, avec des taux d'évaporation estimés à 0.2% par jour.

Cependant, en raison de l'écart entre l'infrastructure ferroviaire et les stations-service et des coûts de transport élevés liés au train, il est peu probable que cela devienne une option pour la distribution d'hydrogène [11].



Fig.1.10: Grande échelle d'hydrogène transporté par les chemins de fer [11].

2.4.3. Transport maritime

Le transport intercontinental de l'hydrogène sera effectué sous forme liquide à l'aide de navires. À cet effet, des navires spécialisés munis de réservoirs et d'installations portuaires appropriés sont en cours de conception. Le transport d'hydrogène gazeux par navire n'est pas économiquement réalisable puisque la quantité transportée est faible par rapport à la zone qu'il couvre sur le navire. Cependant, certains pétroliers à hydrogène à grande échelle ont été étudiés en détail dans le cadre du Programme de recherche du Réseau mondial de l'énergie. En 1998, la principale conclusion d'une étude des trois premières années était qu'un navire-citerne d'une capacité de 200,000 m³ ou d'environ 14 millions de kg d'hydrogène liquide pouvait être construit en utilisant dans une large mesure la conception et les concepts de base utilisés pour le transport de GNL.



Fig.1.11: Kawasaki conception de l'industrie lourde pour les transporteurs d'hydrogène liquide

2.4.4. Transport routier

Aujourd'hui, la méthode la plus courante pour le transport de l'hydrogène se fait par camions. L'hydrogène peut être transporté sous forme gazeuse en utilisant des cylindres à haute pression, des remorques à tubes et sous forme liquide dans des réservoirs cryogéniques. Ce mode de transport est la voie la plus économique pour une pénétration moyenne du marché. Les camions citernes pourraient transporter des quantités relativement importantes d'hydrogène et atteindre des marchés situés dans de grandes régions géographiques. Les camions de quarante tonnes peuvent transporter 3,500 kg d'hydrogène liquide. Ainsi, le transport d'hydrogène liquide est limité par le volume, et non par le poids. Le principal problème avec le transport d'hydrogène liquide serait les exigences d'isolations spécialisées et les pertes de pompage et de re-refroidissement de l'hydrogène liquide le long du chemin



Fig1.12: Types de transport routier : (a) camions citernes, (b) remorques à tubes

2.5. Application de l'hydrogène

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique permet d'obtenir de l'énergie sans production de gaz à effet de serre. De même, selon le mode de production utilisé, il est possible d'obtenir de l'hydrogène propre et de réaliser une chaîne d'approvisionnement en énergie propre. Depuis longtemps, L'hydrogène est déjà une matière de base dans l'industrie chimique et pétrochimique. Il peut être fabriqué spécifiquement pour répondre aux besoins d'une industrie ou être un sous-produit dans une autre fabrication (fabrication d'éthylène ou de chlore par exemple). Il est également utilisé dans l'industrie agroalimentaire (hydrogénation de graisses ou de sucre),

la pharmacologie, l'électronique (fabrication des semi-conducteurs), l'industrie verrière et la métallurgie (traitement réducteur des métaux)[12].

2.5.1. Industrie chimique et pétrochimique

Les utilisations industrielles de l'hydrogène sont principalement la fabrication d'ammonia NH_3 , qui sert de matière première pour l'industrie des engrais. La quantité d'hydrogène utilisée aujourd'hui pour la fabrication de produits chimiques tels que les amines, le méthanol, l'eau oxygénée, ...etc., est très inférieure à celle nécessitée par la fabrication d'ammoniac.

2.5.2. Hydrogène comme vecteur énergétique

L'hydrogène peut être converti en électricité, en chaleur ou en force motrice selon l'usage final. Il a l'avantage de présenter une capacité de stockage intéressante (problématique avec l'électricité) et de pouvoir être produit sans émission de CO_2 . En tant que vecteur énergétique, il trouve ainsi une multitude d'applications.

2.5.2.1. Application stationnaire

Il permet le stockage d'énergie dans les bâtiments en assurant une fourniture d'électricité et de chaleur grâce à la cogénération, ce qui permettrait le développement des bâtiments à énergie positive.

2.5.2.2. Application mobile

L'hydrogène peut alimenter des véhicules équipés de moteurs à combustion fonctionnant au gaz. Par ailleurs, un réservoir d'hydrogène peut-être associé à une pile combustible pour améliorer l'autonomie de véhicules électriques (électromobilité de 2^e génération, la première correspondant aux véhicules électriques actuellement en cours de développement).

a. Moteurs à combustion interne

Dans un moteur à combustion interne traditionnel, l'hydrogène peut être utilisé comme combustible. Sa présence, combinée avec de l'oxygène, va alors provoquer une explosion et faire tourner un piston qui actionnera un moteur. C'est donc de l'énergie mécanique qui est ici créée. Le secteur des transports est concerné par cette application

b. pile à combustible

Une pile à combustible est une pile dans laquelle la génération d'une tension électrique se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple

l'hydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air.

3. Generalites Dessalement de l'eau de mer

3.1. Définition du dessalement de l'eau de mer

Le dessalement s'appelle aussi désalinisation ou plus rarement dessalage. Il consiste à Séparer l'eau et les sels à partir d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau Saumâtre d'origine continentale. L'eau de mer contient en moyenne 35g/L de sel qui Sont essentiellement des chlorures de sodium (76%) et de magnésium (11%), des Sulfates de magnésium (5%), de calcium (3,5%) et de potassium (2,4%) [13].

3.2. Schéma général d'une installation de dessalement

On peut diviser une installation de dessalement en 4 postes principaux:

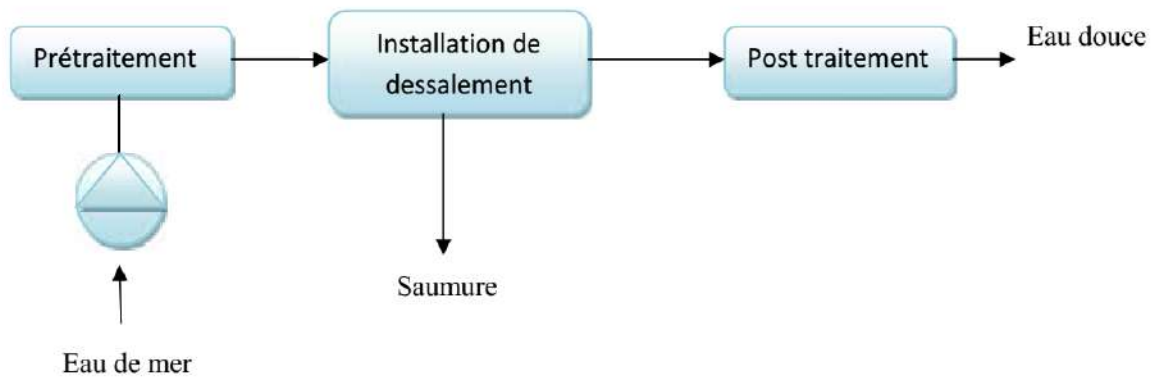


Fig.1.13: Schéma général d'une installation de dessalement [14].

3.2.1. Alimentation en eau de mer

Peut s'effectuer soit par prise directe, soit par puits côtiers. Ce dernier système permet D'obtenir une eau non turbide, ce qui soulage les prétraitements [13].

Dans le cas où l'eau provient de la mer via une prise d'eau à ciel ouvert, le système Comprendra les têtes de prises d'eau, les conduites d'acheminement des têtes de prises D'eau vers les puits de prises d'eau, la station de pompage dans le puits et les conduite sà terre, du puits à l'installation de prétraitement. Les têtes de prises d'eau doivent être Correctement situées afin d'éviter l'aspiration de matériaux flottants ou de sédiments Pour garantir une alimentation suffisante en eau salée [15].

3.2.2. Prétraitement:

La salinité, les matières en suspension ainsi que les matières organiques des différents Océans ou mers du globe sont très variables. Les systèmes de prétraitement de l'eau Demer avant dessalement ont pour but d'éliminer les matières en suspension et le Plancton qui sont susceptibles de colmater les installations de dessalement [13].

Chloration : Bloque la prolifération des organismes vivants. Evite l'obstruction des conduites.

Filtration : Protège les pompes et assure le bon fonctionnement des pulvérisateurs

Antitartre : La distillation favorise la précipitation du carbonate de calcium qui se Dépose sur la paroi des échangeurs et réduit le transfert de chaleur [13].

3.2.3. Installation de dessalement

C'est le système qui retire les sels de l'eau brute (eau saumâtre ou eau de mer). Ce Système peut être un « système membranaire », un « système thermique » ou « un autre Système ». Le choix de la meilleure technologie de dessalement peut dépendre de la Géographie, de l'environnement, de la maturité de la technologie, de l'eau brute et de la Qualité de l'eau produite, de la disponibilité des technologies, de l'énergie nécessaire au Fonctionnement de l'installation disponible, de la capacité des opérateurs à faire Fonctionner cette technologie, des coûts, ... etc. [15].

3.2.4. Post-traitement :

Permet de potabilité l'eau en 2 étapes (en sortie de l'unité de dessalement, l'eau n'est Pas potable car elle est déminéralisée).

- **Correction de la corrosivité** : le traitement consiste à ajouter du Ca(OH)_2 ou du CaCO_3 .
- **Désinfection finale** : bien que certains procédés (osmose inverse) retiennent tous les microorganismes, il est nécessaire d'assurer une désinfection à la sortie de l'usine [13].

3.3. Différents procédés de dessalement

Un auteur a identifié 27 méthodes de dessalement, qui peuvent être classées en trois groupes :

Procédés faisant intervenir un changement de phase

- La distillation
- Congelation

Procédés membranaires

- Transfert d'ions sous l'action d'un champ électrique (électrodialyse).
- Transfert d'eau sous l'action d'un gradient de pression (osmose inverse)

3.3.3.Procédés chimiques :

- Echange d'ions,
- Extraction par solvant [13].

Parmi les procédés précités, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause d'éléments généralement liés à la consommation d'énergie et/ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent [16].

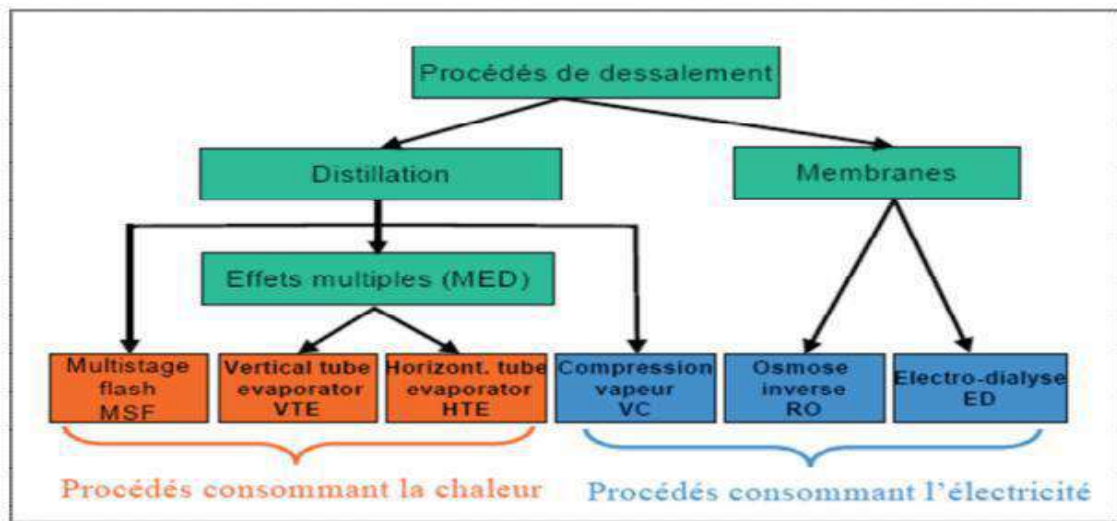


Fig.1.14: Les procédés de dessalement [17].

3.3.1. Procédés de dessalement par changement de phase

3.3.1.1. Distillation

Ce procédé est la première technique historiquement utilisée dans le dessalement de l'eau de mer du fait, probablement, de sa simplicité. Cette méthode consiste à faire

évaporer l'eau salée grâce à la chaleur produite par une chaudière ou plus simplement Par le soleil. Par ce processus, les sels ainsi que les autres composés dissous se déposent tandis que de la vapeur d'eau s'élève. Cette dernière est ensuite recondensée afin de recueillir l'eau douce [18].

3.3.1.2. Principe

Sur ce montage, l'eau de mer contenue (en 2) est chauffée au moyen d'un bec bunsen (en 1). L'eau se transforme alors en vapeur et passe (en 3), où sa température est évaluée à l'aide d'un thermomètre[12] (en 4). La vapeur passe ensuite (en 5) dans la colonne réfrigérante (alimentée en eau froide par le 6 et le 7). Elle est alors condensée et redevient donc liquide. Ainsi (en 8) on obtient de l'eau pure et parfaitement potable

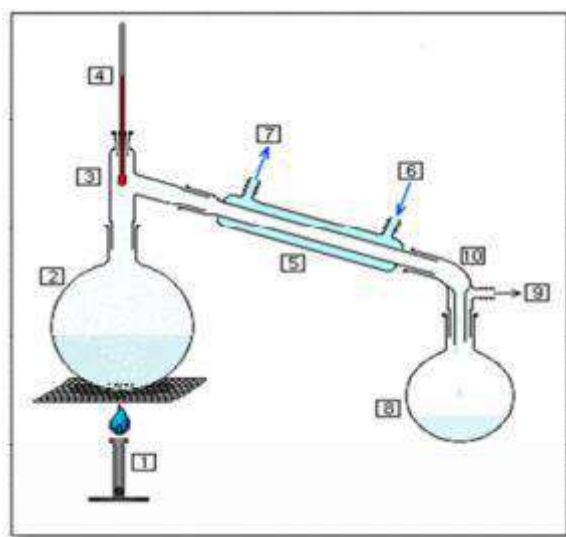


Fig.1.15: Principe de distillation [13]

3.3.1.3. différents types de distillation

Les procédés de distillation qui peuvent être utilisés sont les suivants :

a. Distillation à simple effet

Son principe est simple il reproduit le cycle naturel de l'eau :

1. Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer.
2. La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide.
3. Un groupe électropompe soutire l'eau condensée; un deuxième l'eau de mer Concentré eau saumure [13].

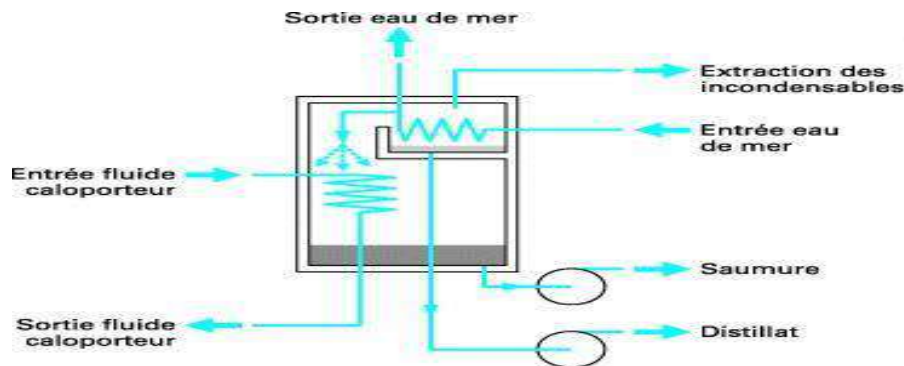


Fig.1.16 : Schéma d'une distillation à simple effet [13].

b. Distillation à multiples effets (MED)

Une installation de distillation à effet multiple est constituée par la juxtaposition de n cellules fonctionnant selon le principe de l'effet simple (Fig.1.17). Le fluide de réchauffage porte à l'ébullition l'eau de mer admise dans la première cellule (entre 70 et 80°C), qui est aussi la cellule où règne la température la plus haute. La vapeur émise par l'ébullition de l'eau de mer est transférée dans la cellule voisine, où on maintient une pression légèrement inférieure. La température d'ébullition diminuant avec la pression, on vaporise l'eau de mer présente dans la deuxième cellule. C'est le deuxième effet. On peut évidemment répéter l'opération plusieurs fois, la limite basse étant donnée par la température de l'eau de mer froide [13].

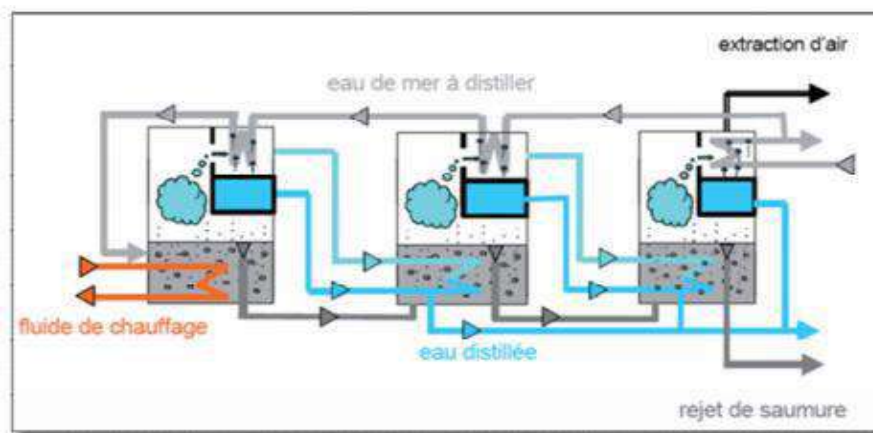


Fig1.17: Distillation à multiple effet [13]

c. distillation Multi-Flash (MSF)

Ce procédé dit « Flash » consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage. Lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C, elle est

introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation partielle instantanée par détente appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore (Fig.1.18) pour se condenser sur les tubes du condenseur placé en haut de l'enceinte et l'eau liquide est recueillie en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation. L'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène Flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série[13] d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle

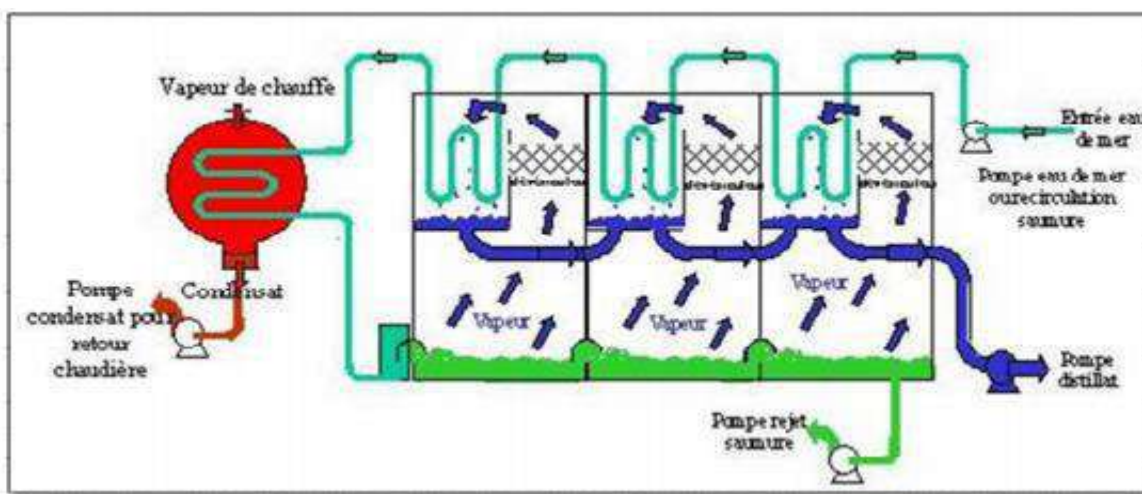


Fig.1.18: Principe de fonctionnement d'un système par détentes successives (MSF) à 3 étages [13].

d.distillation par compression de vapeur (VC)

Le procédé de distillation par compression de vapeur (VC) est utilisé pour des installations de dessalement de petite ou moyenne capacité. Le procédé par compression de vapeur diffère des autres procédés de distillation en ce qu'il n'utilise pas de source de chaleur extérieure mais la compression de la vapeur d'eau.

L'eau à dessaler est portée à ébullition dans une enceinte thermiquement isolée, la vapeur produite est aspirée par un compresseur qui élève sa température de saturation. Cette vapeur traverse ensuite un faisceau tubulaire placé à la base de l'enceinte et se condense en provoquant l'ébullition de l'eau salée.

En ce qui concerne le fonctionnement de ce système, l'eau de mer se vaporise, par exemple à la température de 90 °C et à la pression de 0,7 bar absolu. La vapeur ainsi produite est ensuite comprimée jusqu'à la pression de 1 bar absolu, puis envoyée dans le faisceau de chauffe du bouilleur ou elle se refroidit à pression constante, puis se condense en cédant à l'eau de mer la chaleur nécessaire à son ébullition [13]

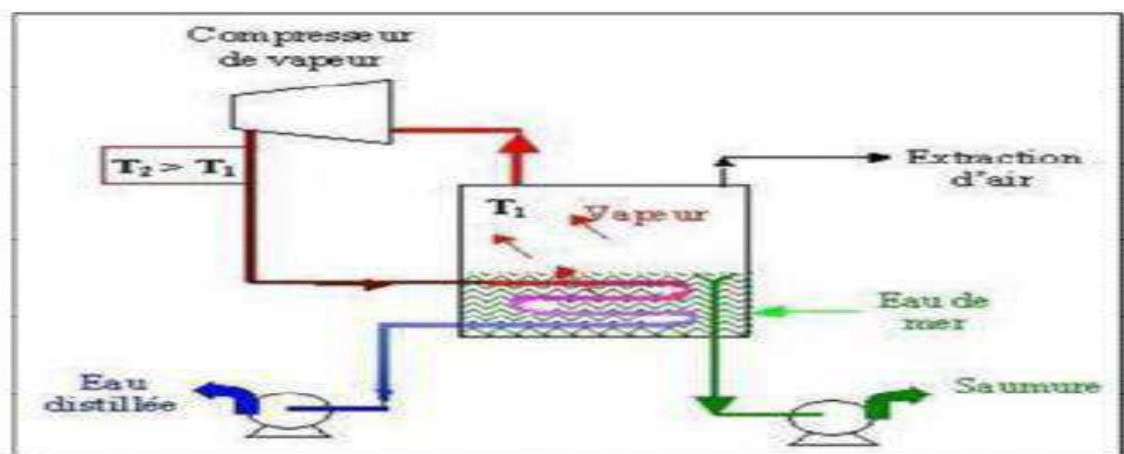


Fig. 1.19 : Schéma de principe d'une unité d'évaporation avec Compression de Vapeur [13]

3.3.1.2. Congélation

La congélation de l'eau de mer fournit des cristaux de glace exempte de sel, et depuis des temps immémoriaux, les riverains des mers arctiques se sont ainsi procuré de l'eau douce [13].

a. Dessalement par congélation

Lorsqu'on refroidit une eau de mer jusqu'à environ -2°C, il y a formation de cristaux de glace constitués d'eau douce. L'eau de mer étant alors plus concentrée, elle résiste mieux à la congélation. Si l'on fait baisser davantage la température, la production de glace augmente.

Signalons cependant qu'au environ de -9°C, le sulfate de sodium décahydraté a tendance à précipiter. Pour produire de l'eau pure, il est donc préférable de ne pas refroidir l'eau au -dessous de cette température.

Le dessalement des eaux de mer par congélation est particulièrement intéressant dans les régions où la température de l'eau est souvent inférieure à 0°C, car dans ces conditions, on peut aménager des bassins à ciel ouvert. Lorsque la température est

suffisamment basse, on remplit ces bassins sur une hauteur de 10 à 15 cm, lorsque la couche de glace atteint une épaisseur de 1 à 1,5 cm, on enlève la saumure et on recueille la glace, qu'il ne reste plus qu'à laver et à faire fondre (il faut utiliser 30 à 35% de l'eau douce ainsi produite pour laver la glace et la débarrasser de sa pellicule d'eau de mer) [13].

3.3.2. Procédés membranaires

Les techniques dites de séparation par membranes, constituent une révolution dans le domaine du traitement de l'eau de mer. Leur principe consiste non pas à éliminer chimiquement les microorganismes mais à les extraire physiquement. Elles n'utilisent aucun réactif chimique, sauf pour leur entretien. Très fiables, elles permettent de produire une eau très pure et de qualité constante [13].

3.3.2.1. Osmose inverse (OI)

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si l'on considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes, l'osmose se traduit par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée.

Si l'on applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Avec une pression suffisamment forte, le flux d'eau va même s'annuler: cette pression est nommée la pression osmotique. Si l'on dépasse la valeur de la pression osmotique, on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique: c'est le phénomène d'osmose inverse [13].

3.3.2.2. Electrodialyse

L'électrodialyse est un procédé à membranes très ancien puisque la première installation date des années 1960[13]. Ce procédé consiste à éliminer des sels dissous dans l'eau saumâtre par migration à travers des membranes sélectives sous l'action d'un champ électrique .

L'électrodialyse consiste à transférer des ions de sels dissous à travers des membranes qui ne laissent pas passer l'eau purifiée, le mouvement des ions est provoqué par un champ électrique, l'électrode négative (cathode) attire les cations, tandis que les anions se déplacent vers l'électrode positive (anode) (fig.1.20).

Les installations sont formées d'empilements compartimentés de membranes alternative anionique et cationique, un compartiment sur deux renferme des saumures concentrées et un sur deux du permet épuré [19].

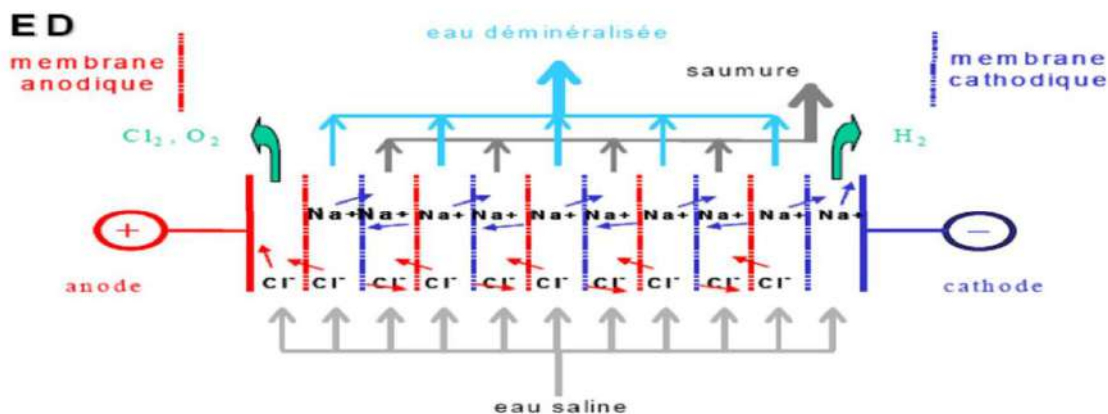


Fig. 1.20 : Principe de dessalement par l'électrodialyse [19].

3.3.3. Procédés chimiques

3.3.3.1. Echangeurs d'ions

L'échange d'ions est la technologie de choix pour éliminer des contaminants spécifiques de l'eau potable. Comparé à d'autres procédés, l'échange d'ions est très sélectif et se trouve utilisé dans de nombreuses applications à grande échelle, pour l'élimination ciblée de la dureté, des nitrates, du bore, des matières organiques naturelles, des perchlorates, [13] des chromates, de l'uranium et de divers autres métaux.

3.3.3.2. Extraction par solvants

L'extraction par solvant est l'opération fondamentale qui permet d'extraire un composé (soluté) d'un liquide, par un autre liquide (solvant). Cette méthode repose sur la miscibilité de certains solvants avec l'eau, [13] sans être solvant pour les sels. On obtiendra de l'eau douce par extraction.

4. Conclusion

L'hydrogène, un vecteur énergétique plutôt qu'une énergie primaire, présente un énorme potentiel pour stocker et transporter l'énergie de manière propre et durable, sans émissions de dioxyde de carbone. Après la production, vient le processus de stockage et de transport de l'hydrogène, et enfin son utilisation finale dans différents secteurs. Les

technologies de dessalement jouent donc un rôle essentiel dans la fourniture d'une source durable d'eau douce, Cela se fait en convertissant l'eau salée en eau potable ou en eau douce de nombreuses techniques de dessalement de l'eau sont disponibles, telles que la distillation, l'osmose inverse et l'électrolyse..

CHAPITER2 : PRODUCTION D'HYDROGENE DANS L'ALGERIE

1. INTRODUCTION

L'Algérie figure parmi les pays africains leaders dans le domaine de l'énergie, disposant de réserves considérables de gaz naturel et de pétrole et un énorme potentiel d'énergie renouvelable. Néanmoins, soucieuse de diversifier ses sources d'énergie et de réduire sa dépendance aux combustibles fossiles, l'Algérie s'engage résolument vers les énergies propres et durables et la production d'hydrogène.

Dans ce chapitre, nous présenterons Potentialités du algérien (solaire, éolien, hydrique, gaz Natural) et Déploiement de la filière hydrogène.

2. Potentialités du l'algérien

2.1. Potentiel d'énergie renouvelable

L'Algérie, un pays très vaste d'un climat très diversifié, ayant deux grandes zones géographiques distinctes, le Nord méditerranéen et le Sud saharien, peut devenir un bon concurrent dans cette course aux énergies renouvelables. Ces énergies renouvelables sont issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des ressources illimitées. Elles regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisé et l'énergie utile obtenue [11].

2.1.1. Potentiel solaire

Le Sahara algérien constitue un des plus importants gisements solaires au monde. Avec un ciel clair, quasiment sans nébulosité, le Sahara est le domaine du soleil. Le durée d'insolation, de l'ordre, de 3500 heures/an est la plus importante au monde. Elle est toujours supérieure à 8 heures/jours A l'extrême sud ou elle descend jusqu'à 6 heures/jour durant l'été.

Pendant l'été, elle peut atteindre jusqu'à plus de 12 heures/jour au centre du Sahara. De par sa position géographique, la durée d'insolation journalière ne présente pas d'importante écarts entre les différents mois de l'année, comme c'est le cas des villes du nord du pays. Ceci permet une disponibilité égale durant toute l'année. L'irradiation solaire reçue par an est de l'ordre de 2650kwh/m.la puissance reçu par jour est toujours supérieurs à 5kwh/m² et peut atteindre facilement les 7kwh/m². La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présent le plus grand potentiel de tout le pays. [20] Si

toute cette énergie est mise en valeur, cela constituerait une source d'énergie très importante et un revenu inestimable.

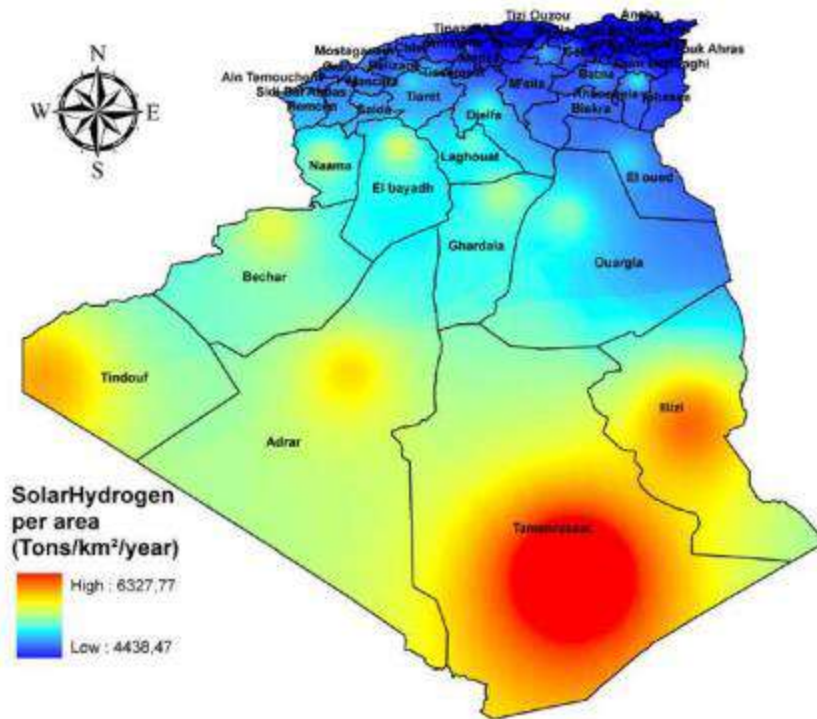


Fig.2.1 : Potentiel d'hydrogène solaire [21].

2.1.2. Potentiel éolien

En plus du gisement solaire, algérien et plus particulièrement la région centre et ouest constitue un important gisement éolien. Avec une vitesse annuelle moyenne de 6m/s à 10m du sol, la région d'Adrar représente l'énergie éolienne la plus importante de tout le pays [19].

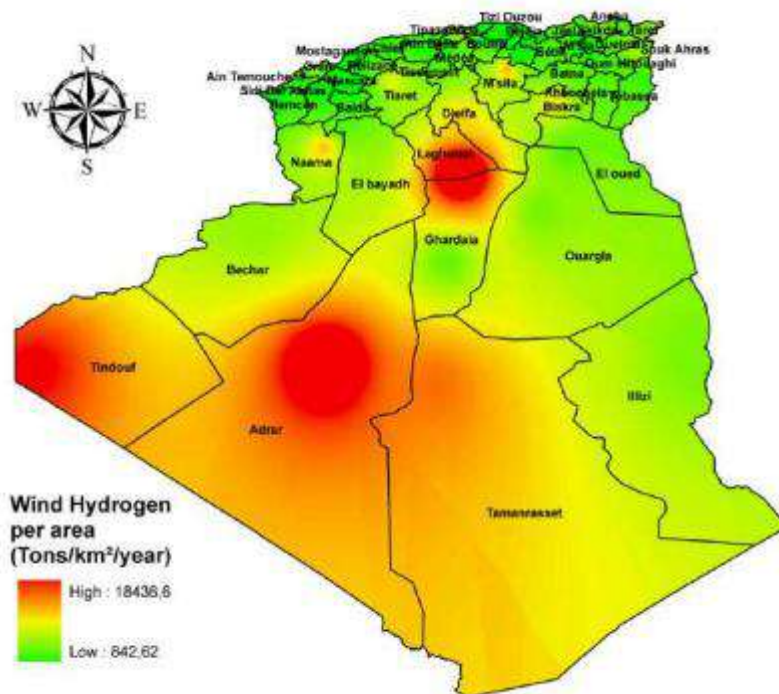


Fig.2.2 : Potentiel d'hydrogène éolien [21].

2.1.3. Potentiel hydrique

Au Sahara, les besoins en eau sont satisfaits par les eaux souterraines. Les ressources superficielles, d'un potentiel de l'ordre de 600 millions m³/an, se trouvent surtout au nord du Sahara. Toutes ces ressources. Peu renouvelables et surexploitées peuvent s'avérer insuffisantes. Néanmoins, l'existence d'une nappe a aquifère attribuée à l'albien peut jouer un rôle majeur dans le développement de la région.[20] S'étendant de l'ouest de la Libye et de la Tunisie à région d'Adrar et de Biskra et de Laghouat jusqu'à Illizi, cette nappe couvre une superficie de 800000km².les réserves sont estimées à 61010m³.sa profondeur varie d'est en ouest ; elle de quelques dizaines de mètres à Adrar, de quelques centaines de mètres à Ghardaïa et Ouargla et plus de 1700m à Touggourt [20].

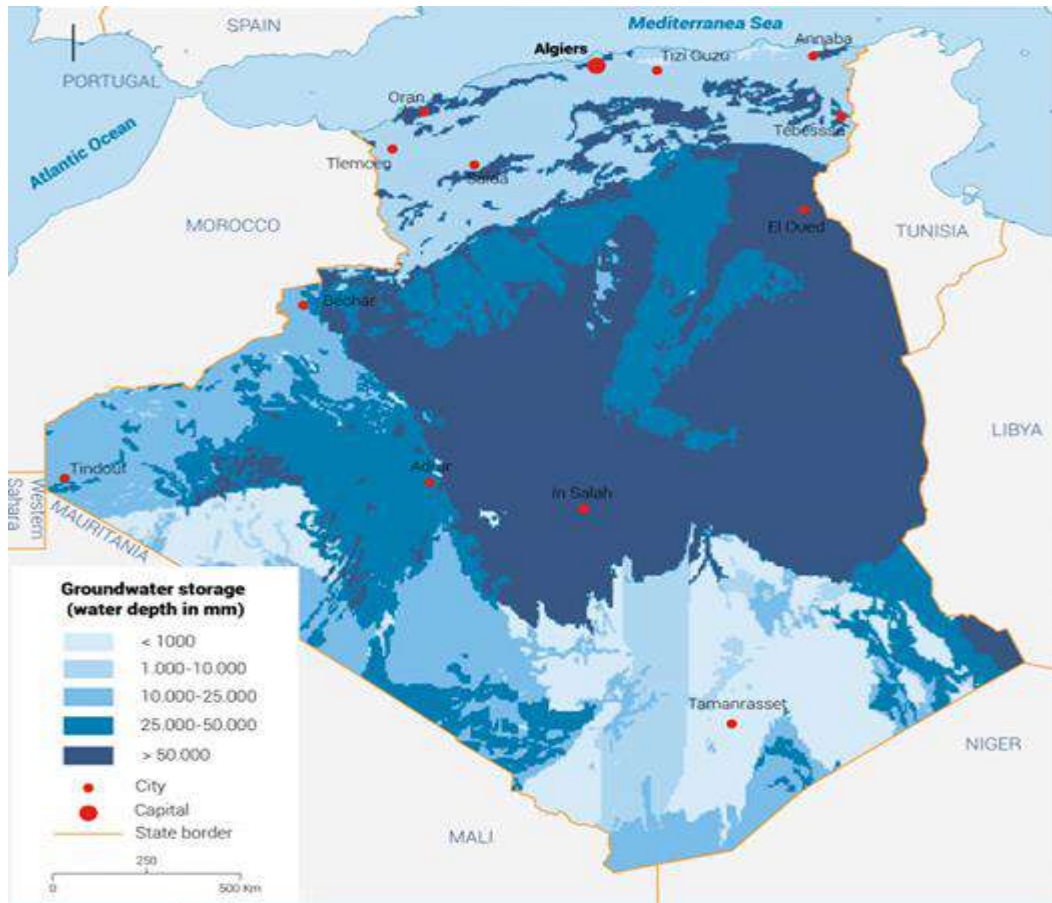


Fig.2.3 : Potentiel hydrique [22].

2.2. Gaz Naturel

Le gaz naturel n'est pas une ressource renouvelable mais importante vecteur énergétique. En plus du pétrole, le Sahara renferme de très importantes réserves gazières. Ces réserves, dont les réservoirs sont de l'ordre de 31012m^3 , sont situés principalement à Hassi Massoud, Hassi Touil, Rhourd nous Haoud Berkaoui, Adrar et Tin Fouye Berkaoui. La production du gaz naturel est de l'ordre de 60 milliards de m^3 avec autour de 10 milliards pour la consommation nationale. Un vaste réseau, long d'un peu plus de 1500 km, achemine le gaz naturel vers les consommateurs nationaux et les complexes de liquéfaction. Des méthaniers assurent sa livraison aux clients étrangers. Deux gazoducs, à travers la mer, délivrent du gaz naturel à l'Europe [20].



Fig.2.4 : réseau gazoduc [23].

3. Feuille de route pour la mise en œuvre de la stratégie de développement de l'hydrogène

La mise en œuvre de la feuille de route nationale pour le développement de l'hydrogène se décline en actions et mesures devant garantir une intégration progressive de l'hydrogène renouvelable et propre dans le système énergétique national à court, moyen et long termes, ainsi que la maîtrise et l'encadrement de l'ensemble de la chaîne de valeur[24] Elles sont présentées selon les axes suivants :

3.1. Déploiement de la filière hydrogène

La mise en place et le lancement d'une filière industrielle pour la production de l'hydrogène renouvelable et propre en Algérie, reposeraient sur une phase initiale déployant divers projets pilotes et de démonstration.

Cette étape, nécessaire pour la mise en œuvre efficiente du programme Hydrogène, permettra de développer de l'expertise, du savoir-faire et de la maîtrise industrielle locale, de tester diverses solutions technologiques et procédés industriels et d'identifier les contraintes opérationnelles (maintenance, coûts d'exploitation et coûts de revient, ...) [24], tout en bénéficiant de l'expertise et du soutien de divers partenaires et de pays

ayant déjà une certaine expertise. Ces projets pourraient bénéficier de financements issus des institutions financières algériennes et internationales.

Des études de faisabilité et de rentabilité économique du passage à l'hydrogène renouvelable et propre seront réalisées pour compléter celles existantes. Elles permettront d'analyser la chaîne de valeur (industrie et services) d'hydrogène et le potentiel des acteurs publics et privés nationaux dans le développement de la filière hydrogène ainsi que la structure du marché de l'hydrogène et son adéquation avec la stratégie énergétique du pays [24].

Afin d'atteindre des coûts compétitifs de production de l'hydrogène renouvelable à long terme, les différents aspects liés à la maîtrise des coûts de sa production seront étudiés. Cela passera par une connaissance approfondie du potentiel du pays en gisements solaire et éolien ainsi que ses capacités en eau de surfaces et souterraines et ce, au niveau de toutes les régions et localités du pays.

Ces études permettront l'identification des régions les plus favorables pour abriter les premiers projets pilotes et de démonstration et l'élaboration des cartographies des sites éligibles à la production en masse des énergies renouvelables et de l'hydrogène vert

D'autres études réservées à l'identification du potentiel national en matière de traitement des eaux usées et leurs exploitations dans la production de l'hydrogène vert et ce, pour chaque localité du pays seront menées. Les capacités du transport de l'hydrogène par canalisation seront également [24] étudiées et serviront d'outils pour la prise de décision quant au déploiement local de l'hydrogène et son exportation.

Les projets pilotes et de démonstration devraient permettre de maîtriser toute la chaîne de valeur de production de l'hydrogène et d'élaborer les modèles économiques y afférents les plus favorables et aideront les entreprises et les pouvoirs publics à comprendre, maîtriser et réguler la chaîne de valeur de l'hydrogène, avant de s'engager dans un déploiement de projets à grande échelle, à la fois capitalistiques et techniquement contraignants.

Au final, cette phase d'initiation devrait permettre d'évaluer les coûts d'investissement et d'exploitation et de capitaliser l'expérience, dans le but d'éclairer aussi bien les opérateurs que les pouvoirs publics quant aux meilleures perspectives d'investissements ciblées et coordonnées, laquelle portera sur le déploiement industriel à plus grande

échelle. Les opportunités de partenariats notamment avec des pays leaders dans la réalisation d'autres projets pilotes et de démonstration seront saisies si nécessaire [24]. Le développement de la filière Hydrogène dépend également, de la réalisation du programme national de développement des énergies renouvelables, et de l'accélération de l'industrialisation des technologies des renouvelables.

Trois étapes de base avec des jalons généraux sont définies afin de couvrir toutes les phases nécessaires au développement de l'hydrogène renouvelable et propre dans le pays : il s'agit de l'évaluation de la maturité technologique et industrielle, déploiement massif et industrialisation et exportation. Ces étapes de base sont échelonnées comme suit:

- Une première phase de démonstration à travers des projets pilotes à court terme 2023-2030 (phase d'apprentissage et d'amorçage).
- Une deuxième phase de mise à grande échelle et création de marché 2030 - 2040 (phase de déploiement).
- Une troisième phase de marché de compétition. 2040-2050 (phase d'industrialisation et d'exportation)

1. **Première phase (2023-2030).**

Durant cette phase, un cadre réglementaire, normatif dédié à l'hydrogène sera mis en place. Des projets de démonstration ou pilote de production d'hydrogène renouvelable et/ou propre seront réalisés. L'hydrogène sera surtout produit sur place, de manière décentralisée, avec un développement limité des infrastructures. L'introduction de l'hydrogène dans les centrales de production d'électricité sera testée dans le cadre de projets pilotes. L'utilisation des piles à combustibles comme moyen de production d'électricité dans les sites loin du réseau électrique sera également considérée. A ce stade, l'accélération du déploiement de l'infrastructure d'approvisionnement, surtout en hydrogène vert, sera encouragée. Pour la réussite de cette phase, il sera mis en place des mesures de soutien et d'aide pour la R&D ainsi que pour les projets de démonstration[24].

2. **Deuxième phase (2030-2040),**

Le déploiement des technologies éprouvées sur le plan opérationnel et la maîtrise techno

logique contribuent à la réduction des coûts et à l'amélioration de la rentabilité. A ce stade, le pays commencera également à tirer profit des synergies entre l'augmentation de la demande d'hydrogène et de la réalisation d'économies d'échelle.

Le développement du marché du PtX doit être guidé par la demande internationale ; les investissements nécessitent une demande fiable à court, moyen et long termes.

Cette démarche devrait être accompagnée par la mise en œuvre des capacités suffisantes de production d'électricité renouvelable.

3. **Troisième phase (2040-2050)**, A ce stade, l'hydrogène vert et/ou ses dérivés seront largement utilisés et deviendront compétitifs tant du point de vue de l'offre que de leurs utilisations finales [24].

4. Conclusion

L'Algérie dispose d'un énorme potentiel qui en fait un leader dans le domaine de la production d'hydrogène. Dans ce chapitre, nous avons discuté de ses capacités et de sa feuille de route pour la mise en œuvre de la stratégie de développement de l'hydrogène.

**CHAPITRE 3 : ESTIMATION DU POTENTIEL DE PRODUCTION
D'HYDROGENE SOLAIRE EN ALGERIE**

1. Introduction

À l'instar des autres pays méditerranéens, l'Algérie est confrontée à des défis majeurs en matière de politique de l'eau. La surcharge du littoral, les disparités entre zones rurales et urbaines, les périodes de sécheresse récurrentes et l'accroissement de la pollution sont autant de facteurs qui fragilisent l'équilibre déjà précaire de l'alimentation en eau. La crise de ressources hydriques qui a menacé ces dernières années l'accès à l'eau potable pour les populations dans diverses régions du pays a accentué l'intérêt de l'Algérie pour le dessalement face à l'urgence de la situation, le gouvernement algérien a inscrit le dessalement d'eau de mer comme un programme prioritaire. Cette technologie s'avère être une solution efficace pour pallier durablement au déficit en ressources hydriques.

Dans ce chapitre nous présenterons des généralités sur les stations de dessalement de l'eau de mer en Algérie, ensuite la modélisation énergétique d'une installation de production d'hydrogène (PV/Elec/SDEM). Enfin, nous discutons les résultats obtenus.

2. Dessalement de l'eau de mer de l'Algérie

Avec une production quotidienne de 2,2 millions de m³, l'Algérie se positionne comme le premier producteur d'eau douce d'Afrique à partir de l'eau de mer (Tableau 1 et Figure 1). Dans le cadre de sa stratégie nationale de gestion de l'eau, l'Algérie ambitionne de construire cinq nouvelles stations de dessalement d'ici 2025. Cet objectif ambitieux permettra à 40% de la population de bénéficier d'une eau potable de qualité et contribuera ainsi à renforcer la sécurité alimentaire du pays [26].

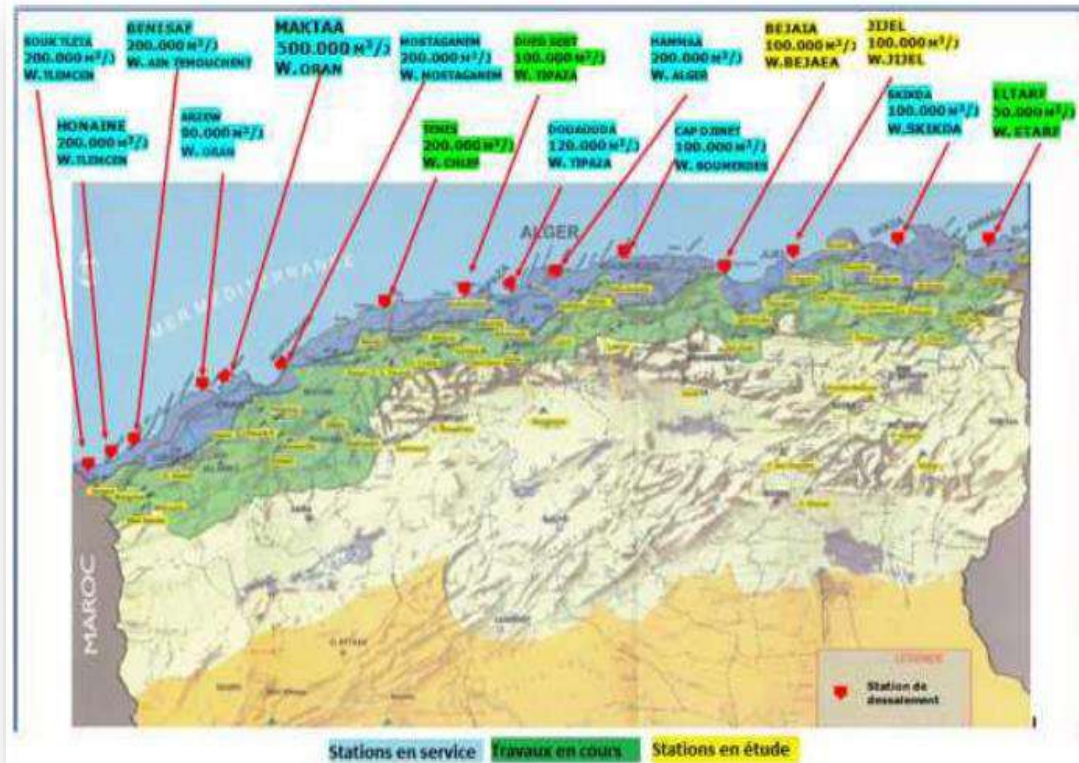


Fig.3.1 : Situation géographique des stations de dessalement en Algérie [27].

Les stations de dessalement génèrent de l'eau douce et de l'eau salée. 45 % de l'eau douce est destinée à la consommation, tandis que les 55 % restants d'eau salée sont rejetés en mer après dilution conformément aux normes environnementales internationales, La Société des Eaux d'Algérie (AEC) envisage d'exploiter cette eau salée pour produire de l'hydrogène vert, une source d'énergie propre. Ce projet offre la possibilité de transformer l'eau rejetée par les stations de dessalement en une source d'énergie durable, contribuant ainsi aux objectifs de développement durable [28].

TAB.3.1 : Principales usines de dessalement d'eau de mer [26].

Localisation de station	Capacité (m³/jour)	Début de l'exploitation (année)	Statut active
Honaine	200000	2012	Site existant
Beni Saf	200000	2010	Site existant
Harzew	88000	2006	Site existant
Mostaganem	500000	2024	Site existant
Tenès	200000	2015	Site existant
Fouka	120000	2011	Site existant
El Hamma	200000	2008	Site existant
Cap Djine	100000	2012	Site en construction ou en réhabilitation
Skikda	100000	2008	Site en construction ou en réhabilitation
Souk Tleta	200000	2011	Site en construction ou en réhabilitation
Mactaa	500000	2024	Site en construction ou en réhabilitation
Corso	80000	2023	Site en construction ou en réhabilitation
Cap Blanc	300000	2024	Nouveau site
Alger-Oues	300000	2024	Nouveau site
Cap Djinet	300000	2024	Nouveau site
Béjaïa	300000	2024	Nouveau site

3. Conception d'installation de production d'hydrogène

L'intégration de la production d'hydrogène vert à partir d'énergie solaire dans les stations de dessalement d'eau de mer offre une solution prometteuse pour répondre à la fois aux défis de la sécurité hydrique et de la transition énergétique. Cette approche innovante permet de valoriser l'énergie solaire pour produire de l'hydrogène qui peut ensuite être

utilisé pour alimenter le processus de dessalement, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles et l'empreinte carbone de l'installation.

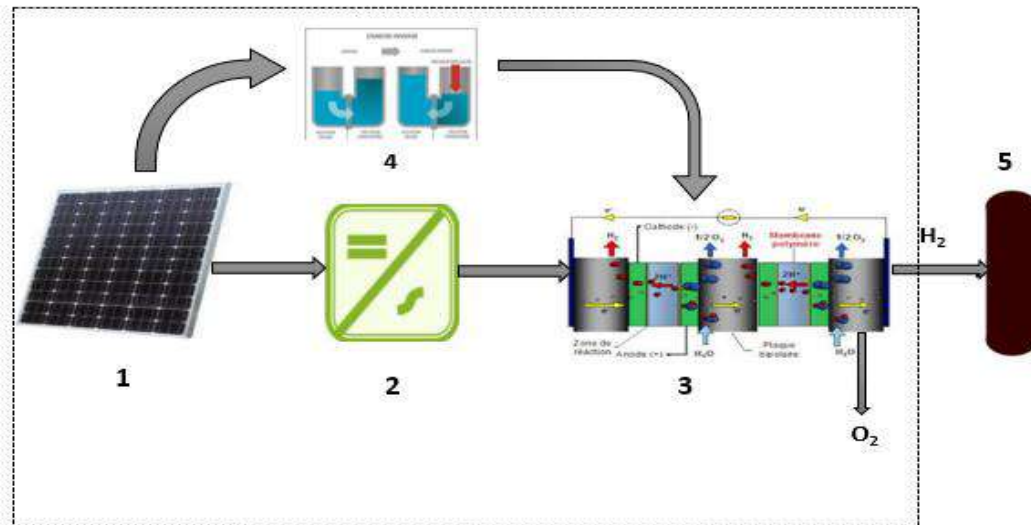


Fig.3.2 : Schéma de principe de fonctionnement de l'installation de production de l'hydrogène (PV/SDEM)

Composants du système

1. Champ photovoltaïque PV (monocristal)
2. Conversion du courant continu (CC) en courant alternatif (CA)
3. Electrolyseur (PEM)
4. Station de Dessalement (osmose inverse)
5. System de stockage d'énergie

Les panneaux solaires photovoltaïques captent l'énergie solaire et la convertissent en électricité, qui se présente sous forme de courant continu, où un transformateur effectue la conversion nécessaire du courant continu en courant alternatif pour la fournir au système de dessalement de l'eau par osmose inverse afin de produire de l'eau douce, qui est séparé par l'électrolyseur en oxygène et hydrogène, et ce en utilisant l'électricité stockée produite par des panneaux solaires pour assurer une alimentation électrique continue à l'électrolyseur, même en cas de faible ensoleillement ou de demande de pointe.

3.1. Champ photovoltaïque PV

Un champ de panneaux solaires photovoltaïques est installé pour capter l'énergie solaire et la convertir en électricité la capacité du champ solaire doit être dimensionnée en fonction de la consommation énergétique de l'électrolyseur et des besoins en dessalement le choix de la technologie photovoltaïque (silicium monocristallin) dépend de facteurs tels que l'efficacité, le coût et la durabilité

3.2. Conversion du courant continu (CC) en courant alternatif (CA)

L'énergie électrique produite par les panneaux solaires photovoltaïques est sous forme de courant continu. Or, de nombreux composants du système, tels que les électrolyseurs, les pompes et les moteurs électriques, fonctionnent en courant alternatif. Le convertisseur DC/AC effectue la conversion nécessaire pour alimenter ces éléments de manière efficace.

3.3 Electrolyseur

- L'électrolyseur utilise l'électricité stockée pour séparer l'eau en hydrogène et en oxygène.
- Le type d'électrolyseur (PEM) dépend de la pureté de l'hydrogène requise, de l'efficacité énergétique et de la capacité de production.

3.4. Station de Dessalement

L'électricité produite par source PV est utilisée pour alimenter le système de dessalement, généralement par osmose inverse, pour produire de l'eau douce.

3.5. System de stockage d'énergie

Un système de stockage d'énergie, généralement des batteries, est nécessaire pour stocker l'électricité produite par les panneaux solaires afin de garantir une alimentation continue à l'électrolyseur, même en cas de faible ensoleillement ou de pics de demande le choix de la technologie de stockage (batteries lithium-ion, stockage par pompage hydraulique, etc.) dépend de facteurs tels que la capacité de stockage requise, le coût et la durée de vie.

4. Modélisation énergétique (PV/ Elec/ SDEM)

4.1. Modélisation énergétique de l'électrolyseur

L'énergie nécessaire pour séparer les molécules d'eau en hydrogène et en oxygène par électrolyse. Cette consommation d'énergie dépend de la technologie d'électrolyse et des conditions de fonctionnement dans cette étude, un électrolyseur de type PEM a été utilisé [21].

Tab.3.2: Principales caractéristiques des électrolytes

Type	PEM
Température de fonctionnement (°C)	80-100
Pression de fonctionnement (bar)	1-70
Consommation électrique (kWh/Nm ³ d'H ₂)	6
Rendement énergétique (%)	80-90
Etat du marché	Mature

L'énergie transférée à l'électrolyseur est définie comme suit [29].

$$E_{ele} = M_{H_2} \times PCI_{H_2} \quad (3.1)$$

E_{ele} :Energie absorbée par l'électrolyseur (kWh/jour)

M_{H_2} :Masse d'hydrogène (kg/jour)

PCI_{H_2} :Pouvoir calorifique supérieur d'hydrogène (kWh/kg)

4.2. Modélisation des modules photovoltaïques

La production d'énergie dans un système photovoltaïque est principalement assurée par le générateur photovoltaïque Désormais, uniquement à l'aide des données climatiques du site (ensoleillement et température ambiante) et des données du constructeur du module, nous pouvons connaître l'énergie disponible en sortie du module photovoltaïque [29].

Dans cette analyse, une capacité de puissance de 52.5 kWh/kg pour l'électrolyseur a été considérée (ce qui correspond à environ 75% de rendement). Le rendement supplémentaire qui est inclut pour tenir compte des pertes d'énergie dans l'électrolyseur est égal à 90% [30].

L'énergie électrique produite par un générateur photovoltaïque est donnée par la relation [29] :

$$E_{pv} = \frac{E_{ele}}{\eta_{ele} \times \eta_p} \quad (3.2)$$

E_{pv} : Energie électrique photovoltaïque (kWh/jour)

E_{ele} :Energie absorbée par l'électrolyseur (kWh/jour)

η_{ele} :Rendement d'électrolyseur (%)

η_p = Le rendement supplémentaire qui est inclut pour tenir compte des pertes d'énergie dans l'électrolyseur

4.3. Surface totale de générateur photovoltaïque

Dans cette étude, la cellule photovoltaïque type monocristallin 72 cellules 320 WC [30]

Tab.3.3.Caractéristiquesde monocristallin 72 cellules 320 WC

Technologie	Type	Rendement de générateur photovoltaïque; %	Surface du modules
	CEM320M-72	16.49 %	1956×992mm

Le Surface totale de générateur photovoltaïque est donné par la relation [28] :

$$A_{pv} = \frac{E_{pv}}{\eta_{pv} \times GHI} \quad (3.3)$$

A_{pv} :Surface totale de générateur photovoltaïque (m²)

η_{pv} :Rendement de générateur photovoltaïque; %

GHI : Irradiation solaire globale sur un plan horizontal; kWh/m²/jour

TAB.3.4 : Irradiation solaire globale moyenne sur un plan horizontal [32].

Wilaya	GHI (kWh/m ² /jour)
Tlemcen	5.070
Ain Témouchent	4.991
Oran	4.964
Mostaganem	4.960
Chlef	4.915
Tipaza	4.770
Alger	5.088
Boumerdés	4.762
Skikda	4.676
Tlemcen	5.070
Oran	4.964
Boumerdés	4.762
Oran	4.964
Alger-ouest	4.773
Boumerdés	4.762
Béjaia	4.588

4.4. Détermination du nombre de modules à installer [33].

$$N_{PV} = \frac{A_{PV}}{A}$$

(3.4)

N_{PV} : Nombre des panneaux solaires nécessaire à l'installation

A : Surface des modules m²

4.5. Energie électrique consommée par SDEM

Une étude effectuée afin d'estimer le besoin d'énergie électrique pour une station

De dessalement d'eau de mer, les résultats sont présentés sur la fig. (3.3)

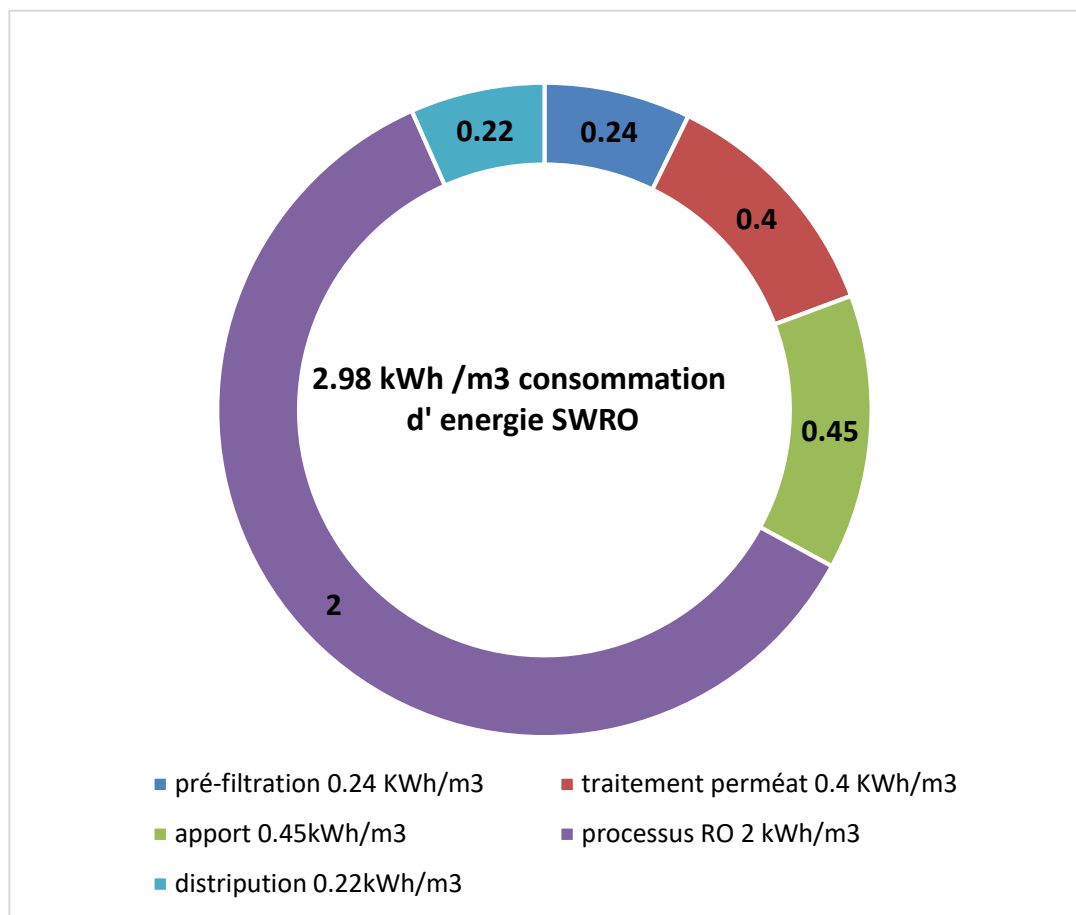


Fig.3.3 : Répartition des ressources de consommation énergétique dans une norme

SWRO Processus

L'étape de pré filtration a besoin de 0.24 kWh/m^3 pour chaque 1m^3 d'eau de mer

SDEM sa consommation variée entre $2\text{-}5 \text{ kWh/m}^3$

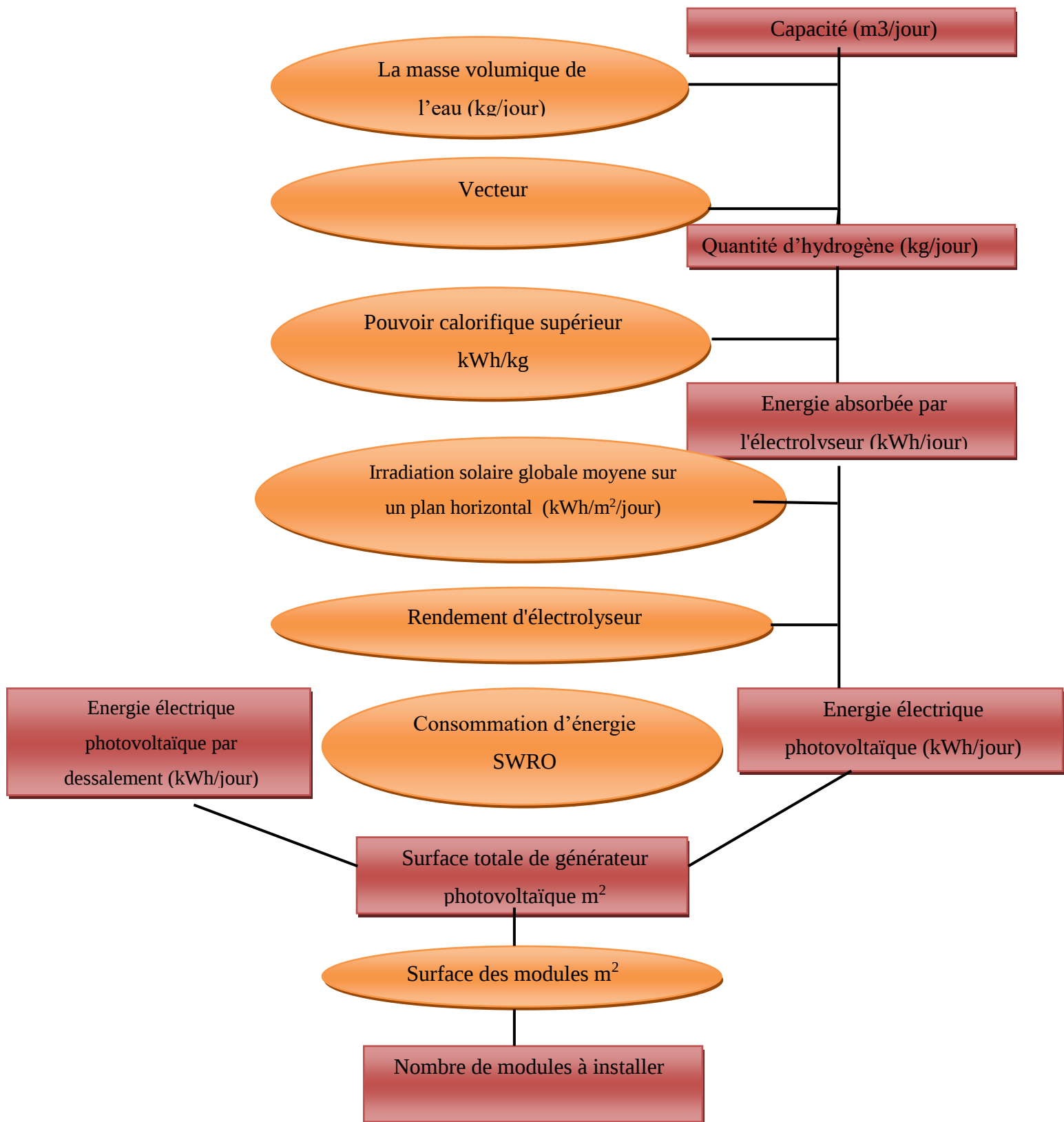


Fig.3.4 : Organigramme de dimensionnement

5. Résultats et discussions

5.1. Système PV alimente seulement l'électrolyseur

Dans cette partie, on suppose que le système PV alimenté seulement l'électrolyseur sans prendre en considération les stations de dessalement d'eau de mer.

Le dimensionnement de l'installation est effectué par la combinaison des modèles énergétique de chaque composant de l'installation. Les calculs sont effectués à l'aide d'un fichier Excel, où nous avons travaillé seulement sur trois stations de dessalement de différente capacité, à savoir la station de Mostaganem (grande capacité), Tnès (moyenne) et Corso (petite capacité).

Capacité: représente la capacité maximale d'eau salée concentrée que le système de dessalement peut produire chaque jour en extrayant le sel de l'eau de mer. Elle est mesurée en mètres cubes (m³) par jour.

Quantité d'hydrogène : représente la quantité réelle d'hydrogène produite par le système par jour. Elle est mesurée en tonnes (t) par jour.

Tab3.5 : Exportations la capacité et a quantité d'hydrogéné dans stations
Mestghanem

Capacité (m ³ /jour)	Quantité d'hydrogène(t/jour)
275000	30463.88889

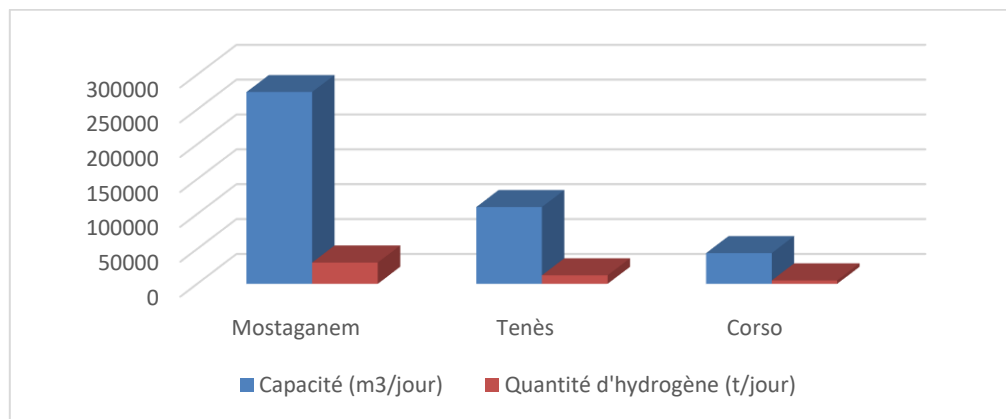


Fig.3.5 : la quantité d'hydrogène produite quotidiennement et la capacité de production de trois types de stations

La figure 3.5. Montre la quantité d'hydrogène et la capacité de production de trois types de stations (Mostaganem, Tenès, corso)

L'analyse des données révèle une relation directe proportionnelle entre la quantité d'hydrogène produite et la capacité de production. En d'autres termes, plus la capacité de production est élevée, plus la quantité d'hydrogène produite est importante, et vice versa.

Énergie absorbée par l'électrolyseur : Cet axe représente la quantité d'énergie électrique consommée par l'électrolyseur pour produire de l'hydrogène. Elle se mesure en giga wattheures (GWh) par jour.

Énergie électrique photovoltaïque : énergie absorbée par l'électrolyseur et énergie PV : Cet axe indique la quantité d'énergie électrique générée par les panneaux photovoltaïques. Elle se mesure en giga wattheures (GWh) par jour.

Tab3.6 : Exportations énergie absorbée par l'électrolyseur et énergie PV et énergie absorbée par l'électrolyseur et énergie PV dans stations Mostaganem

Énergie absorbée par l'électrolyseur (GWh/jour)	Énergie électrique photovoltaïque (GWh/jour)
12005.81861	17786.39794

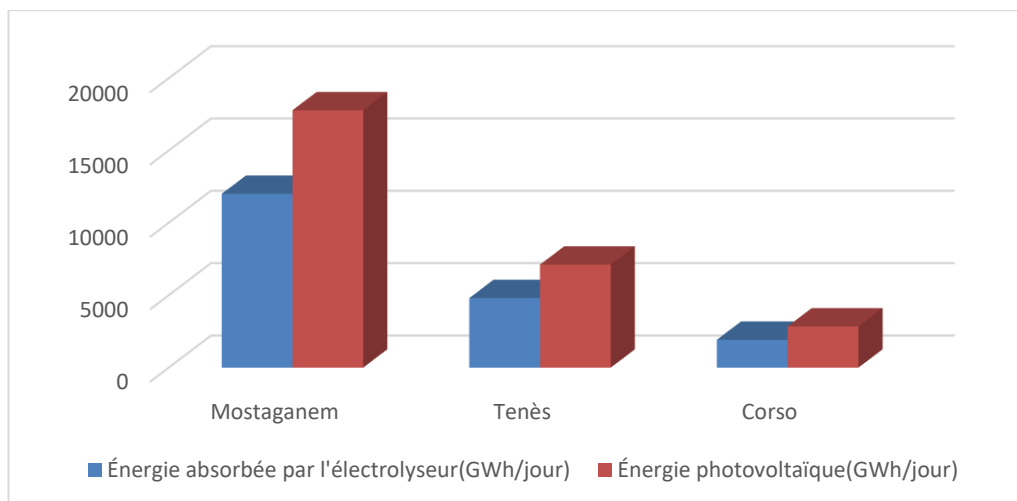


Fig.3.6 : Energie absorbée par l'électrolyseur et Energie électrique photovoltaïque de trois types de stations

La figure 3.6. Montre la Energie absorbée par l'électrolyseur et Energie électrique photovoltaïque de trois types stations (Mostaganem, Tenès, corso).

Énergie absorbée par l'électrolyseur et énergie PV : L'énergie absorbée par l'électrolyseur est directement proportionnelle à la quantité d'hydrogène produite. La puissance générée par le PV doit être suffisante pour répondre à la demande de puissance de l'électrolyseur.

Efficacité de l'électrolyseur : L'efficacité de l'électrolyseur joue un rôle important dans la détermination de la masse réelle d'hydrogène produite à partir de l'énergie photovoltaïque.

Rayonnement solaire : La quantité de rayonnement solaire disponible à l'emplacement du générateur photovoltaïque affecte la production d'énergie photovoltaïque.

Pertes du système : diverses pertes sont associées aux processus de production d'énergie photovoltaïque et hydrogène, telles que les pertes électriques dans les câbles et les pertes d'efficacité dans l'électrolyseur

Surface totale du générateur PV : Cet axe représente la surface totale des panneaux PV utilisés pour produire de l'électricité. Elle se mesure en kilomètres carrés (km²).

Tab3.7 : Exportations Surface totale du générateur PV dans stations Mostaganem

Surface totale du générateur PV (km ²)
217.463149

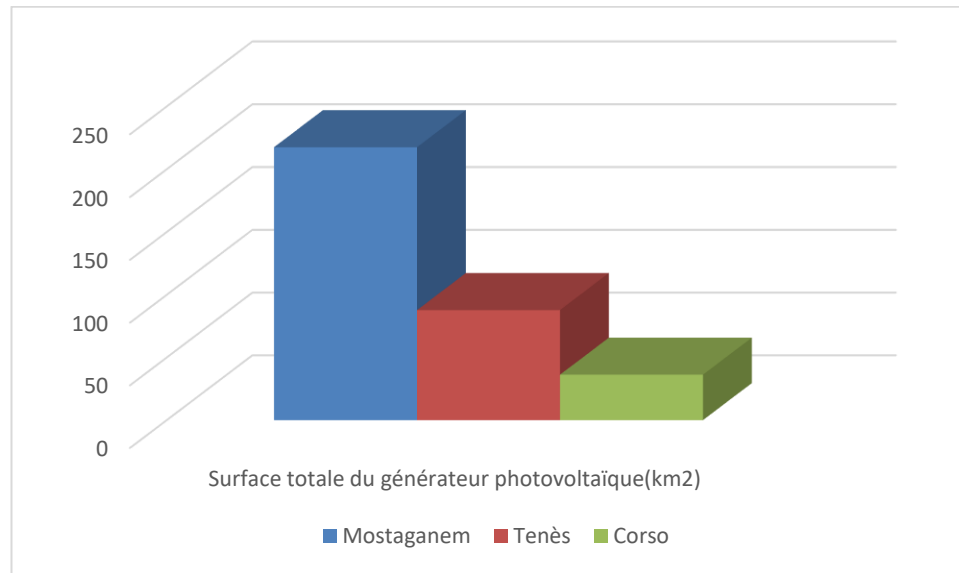


Fig.3.7 : Superficie totale du générateur PV montre de trois types de stations

La figure 3.7 : Montrer Superficie totale du générateur PV montre de trois types de stations à hydrogène (Mostaganem, Tenès, Corso).

Superficie du champ photovoltaïque : La superficie totale du champ photovoltaïque détermine la quantité d'énergie photovoltaïque qui peut être générée. Plus la surface est grande, plus la production d'énergie photovoltaïque est importante.

5.2. Système PV alimente la SDEM et l'électrolyseur

Dans la partie deuxième, on suppose que le système PV alimente l'électrolyseur et les stations de dessalement d'eau de mer.

Energie photovoltaïque total : Cette expression représente la quantité totale d'énergie électrique produite par un système photovoltaïque, compris l'énergie utilisée pour le dessalement.

Tab3.8 : Exportations Energie photovoltaïque total Énergie électrique photovoltaïque et la différence entre eux

Energie photovoltaïque total (GWh/jour)	Énergie électrique photovoltaïque(GWh/jour)	différents
5824.280963	5821.002963	3.278

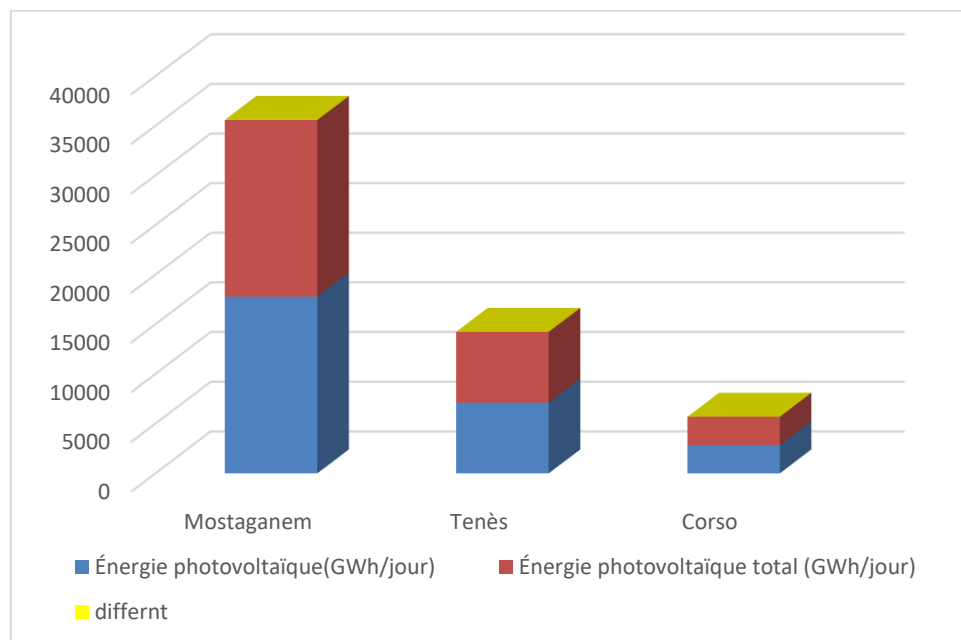


Fig.3.8 : énergie électricité PV et énergie PV total etLa différence entre eux de trois types de stations

La figure 3.8 : Montrer énergie électricité PV et énergie PV total etLa différence entre eux de trois types de stations à hydrogène (Mostaganem, Tenès, Corso).

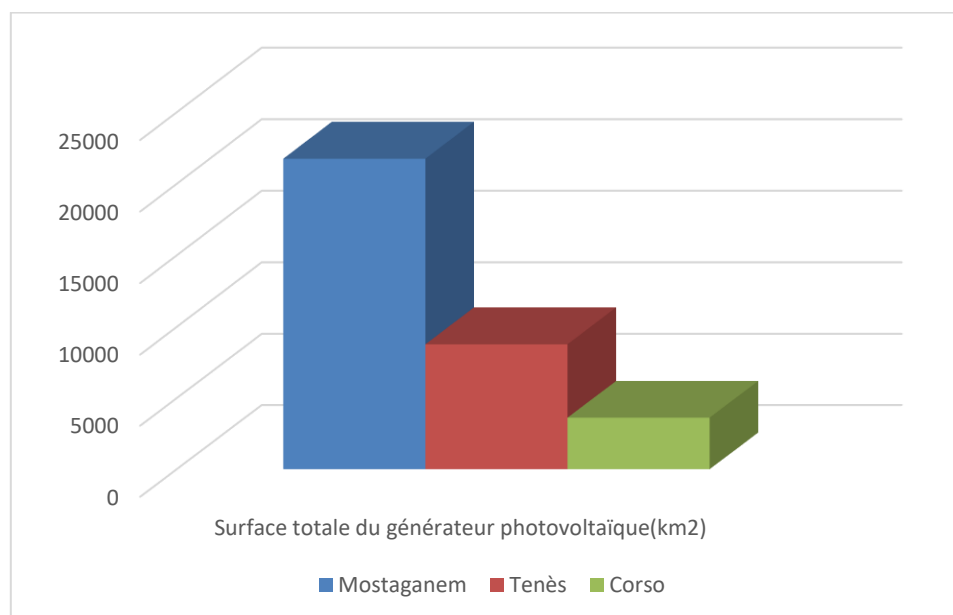


Fig.3.9:Surface total du générateur de trois types de stations

La figure 3. 9 Surface total du générateur de trois types de stations (Mostaganem, Tenés, Corso)(La méthode a été évoquée précédemment)

6. conclusion

Cette étude souligne l'importance de considérer la relation entre la capacité de production de la station de dessalement, la consommation d'énergie de l'électrolyseur et les besoins en énergie solaire lors de la conception et de l'exploitation de systèmes couplés de production d'hydrogène à partir de l'eau de mer.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons mené une étude d'estimation du potentiel de production d'hydrogène vert par l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque au niveau des stations de dessalement d'eau de mer (SDEM) en Algérie.

Pour cela, nous nous sommes appuyés sur le calcul quantité d'hydrogène, Energie absorbée par l'électrolyseur, l'énergie électrique photovoltaïque, surface totale du générateur photovoltaïque, en outre calcul l'énergie de dessalement, l'énergie électrique photovoltaïque par dessalement, surface totale du générateur photovoltaïque

Au début, Nous avons fait une présentation générale sur l'hydrogène son caractéristique et production, stockage, transport et ces application avec dessalement d'eau de mer. Et ses différents procédés.

Par la suite nous avons présenté un aperçu sur les potentialités de l'Algérie pour la production d'hydrogène vert

Dans la partie pratique, nous avons commencé par Conception d'installation de production d'hydrogène composé de panneaux PV, conversion, électrolyseur, osmose inverse. ensuite présenté modélisation énergétique ensuite nous avons sélectionné trois usines de dessalement et calculé chacun des quantité d'hydrogène, Energie absorbée par l'électrolyseur, l'énergie électrique photovoltaïque, surface totale du générateur photovoltaïque en outre calcul l'énergie de dessalement, l'énergie électrique photovoltaïque par dessalement, surface totale du générateur photovoltaïque

Ensuite et discuté des résultats. Il existe une relation directe proportionnelle entre la capacité de station de dessalement et sa production d'hydrogène, c'est-à-dire que plus la capacité de station de dessalement est grande, plus sa capacité à produire de l'hydrogène est grande, et vice versa.

Nous concluons que l'électrolyseur consomme une grande quantité d'énergie photovoltaïque, ce qui indique que plus l'énergie photovoltaïque augmente, plus l'électrolyseur absorbe d'énergie. Ainsi, la production d'hydrogène augmente.

La superficie du champ photovoltaïque détermine la quantité d'énergie photovoltaïque qui peut être générée. Nous concluons Plus la surface est grande, plus la production d'énergie photovoltaïque est importante.

Conclusion générale

L'électrolyseur consomme beaucoup d'énergie photovoltaïque pour produire de l'hydrogène, tandis que l'usine de dessalement n'a pas besoin de beaucoup d'énergie photovoltaïque.

Les perspectives pour les études futures :

- S'appuyer sur une autre source d'énergie, comme l'énergie éolienne.
- L'utilisation du programme Hysys/Homer dans les études futures pourrait aider les chercheurs à mener des études plus précises et plus efficaces.
- étudier la faisabilité et le coût de mise en œuvre du projet.

Bibliographie

Références bibliographiques

- [1] France Hydrogène ;[en ligne] disponible sur : < <https://www.france-hydrogene.org>>
- [2] جباري لطيفة .واقع تحلة مياه البحر.و اشكالية الامن المائي . حالة الجزائر .جوان 2023 مجلد 19 العدد 1
- [3] Viseur ,Mathieu .Etude de faisabilité de l ' utilisation de l ' hydrogène comme vecteur alternatif d'énergie. mémoire de master , Université libre de Bruxelles ,2008
- [4]Jean Benoit -Denis, Étude de l ' influence d ' éléments d ' addition sur les propriétés de stockage de l ' hydrogène dans le système Ti-V-Fe. Thèse de doctorat, Université Paris-Est ,2016
- [5]S.zenagui et M. Tapti, Production De L'hydrogène Par Voie Photovoltaïque. Mémoire de master .université aboubekerbekaid ,Tlemcen.2022
- [6]Y.mehdaoui et M.kapouch,Réalisation d'un Générateur d'hydrogène. mémoire de master ,université de Abou BekerBelkaid .Tlemcen ,2017
- [7] J. Durville, J. Gazeau, J. N. Ing, J. Cueugnet, L. Ing, and M. Septembre, "Filière hydrogène-énergie," 2015.
- [8] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives ,2013 ,Direction de la communication
- [9]connaissancedesenergies ;[en ligne].disponible sur :<<http://www.connaissance-desenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie>>
- [10] Germain Gondor .Pour le stockage de l'hydrogène : Analyse thermodynamique de la formation d'hydrures métalliques et optimisation du remplissage d'un reservoir .Hal open science .2013
- [11]MESSAOUDI DJILALI, contribution à la conception de la chaine logistique de l'hydrogène.Thèse de doctorat,université de KasdiMerbah. Ouargla,2021
- [12] L. Aiche-Hamane, contribution à l'estimation du potentiel d'hydrogène produit par l'énergie éolienne .Thèse de doctorat, Université de Abou BekrBelkaid . Tlemcen,2015
- [13] AMOURA.CHAIMA ,Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse.Mémoire de master , Université de BadjiMokhtar.Annaba, 2020
- [14]MAAFA.AIDA,Dessalement de l'eau de mer .Mémoire d'ingénorat ,Université de 08 mai 1945.Guelma,Séptembre 2020
- [15] I. Ahmouda et H.Biaa, Traitement des rejets de dessalement de l'eau de mer cas de « les dunes » Oran . mémoire de master, Université Larbi Tebssi,2016
- [16] C.Bliefert et al, Chimie de l'environnement (air, eau, sols et déchets). Edition: Boeck &larciel, 2001

- [17] L .Sigg et al, Chimie des milieux aquatique, chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement. Edition : Dunod, 2000
- [18] Berroudja.K, Contribution à l'étude de l'évolution des qualités physico-chimiques et microbiologique de l'eau de robinet du centre ville de Chlef. Mémoire d'ingéniorat, 2003
- [19]F.Rezim et KH.Tacheta, Etude des performances de la station de dessalement d'eau de mer de Fouka Wilaya de Tipza. Mémoire de master,Université Saad Dahlab.Blida1,2020
- [20]H.Touti et Kh.Sardi , simulation d'un système de production d'hydrogène solaire photovoltaïque. Mémoire de master,Université Saad Dahlab.Blida1, 2020
- [21] RAHMOUNI SOUMAIA , Etude prospective de la transition énergétique et l'impact environnemental en algérie .Thèse de doctorat,universitéKasdiMerbah.ouargla,2019
- [22]Stackoverflow ;[en ligne]disponible sur <[http://www. scontent.falg3-2.fna.fbcdn.net](http://www.scontent.falg3-2.fna.fbcdn.net)>
- [23]leconomistemaghrebin ;[en ligne]disponible sur <[http:// www.leconomistemaghrebin.com](http://www.leconomistemaghrebin.com) nouveau-gazoduc-algerie-italie-zappe-tunisie>(consulté le 25/01/2023)
- [24] Stratégie Nationale de développement de l'hydrogène en algérie ,septembre 2023
- [25]F.hamdani et Y.messafeur ,Etude de l'exploitation et le suivi d'une station de dessalement d'eau de mer :cas de la station de Ténès (wilaya de chlef).Mémoire de master ,Université de Saad Dahlab.Blida 1,2018
- [26]S.ouali et A.doucoure ,Adoptingsea water reverse osmosisdesalination technologies for sustainabledevelopment ,avril 2024
- [27]M.Tahar et M.chebki ,etude des performances de fonctionnement d'un ouvrage hydraulique: cas de la station de dessalement d'eau de chatt el hillal de benisaf.mémoire de master, université aboubekerbekaid .Tlemcen,2020
- [28]Algérie presse service ;[en ligne].disponible sur :<<http://www.aps.dz>>(Consulté le 03/10/2023)
- [29]N.Chennouf ,S.Rahmouni ,B. Negrou et N, Settou, Etude technico-économique de la production d'hydrogène par deux applications de l'énergie solaire dans la regiondeouargla ,
- [30] A. Bouziane et Dj.OuledHaddar ,Modélisation prospective sur la durabilité des systemsénerétiqushydrogen. mémoire de master , université de KasdiMerbah.ouargla,2016
- [31] SPA condor electronics ,fabrication PPv
- [32]globalsolaratlas,[en ligne]. Disponible sur :<[http://www. globalsolaratlas.info](http://www.globalsolaratlas.info)>(Consulté le (24/05/2024)

[33] I. Ait salem , etude et dimensionnement des systems d'énergie solaire pour éclairage et pompes forage à la digue de CMG et le Barrière .mémoire licence ,Université de Sultan Moulay Slimane ,2023

Annexes

Annexe I**Tableau I.1** : récapitulatif des résultats de calcul dans le tout station de dessalement de d'eau de mer (PV/ELC))

Localisation de station	Capacité (m ³ /jour)	Quantité d'hydrogène(/jour)	Énergie absorbée par l'électrolyseur(kWh/jour)	Énergie photovoltaïque (kWh/jour)	Superficie totale du générateur photovoltaïque (m ²)
Honaine	110000	12185555.56	480232744.4	711455917.7	8509800.545
Beni Saf	110000	12185555.56	480232744.4	711455917.7	8644497.849
Harzew	48400	5361644.444	211302407.6	313040603.8	3824267.336
Mostaganem	275000	30463888.89	1200581861	1778639794	21746314.9
Tenès	110000	12185555.56	480232744.4	711455917.7	8778166.584
Fouka	66000	7311333.333	288139646.7	426873550.6	5427004.876
El Hamma	110000	12185555.56	480232744.4	711455917.7	8479695.118
Cap Djine	55000	6092777.778	240116372.2	355727958.8	4530101.718
Skikda	55000	6092777.778	240116372.2	355727958.8	4613418.388
Souk Tleta	110000	12185555.56	480232744.4	711455917.7	8509800.545
Mactaa	275000	30463888.89	1200581861	1778639794	21728791.68
Corso	44000	4874222.222	192093097.8	284582367.1	3624081.374
Cap Blanc	165000	18278333.33	720349116.7	1067183877	13037275.01
Alger-Oues	165000	18278333.33	720349116.7	1067183877	13558984.53
Cap Djinet	165000	18278333.33	720349116.7	1067183877	13590305.15
Béjaïa	165000	18278333.33	720349116.7	1067183877	14105717.77

Tableau I.2 : récapitulatif des résultats de calcul dans les tous stations de dessalement de d'eau de mer(PV/ELC/SDEM)

Localisation de station	Capacité (m ³ /jour)	Consommation d'énergie SWRO (kwh/jour)	Energie électrique photovoltaïque (kWh/jour)	Energie électrique photovoltaïque (kWh/jour)	Surface totale du générateur photovoltaïque (m ²)
Honaine	110000	327800	711455917.7	711783717.7	8513721.396
Beni Saf	110000	327800	711455917.7	711783717.7	8648480.761
Harzew	48400	144232	313040603.8	313184835.8	3826029.349
Mostaganem	275000	819500	1778639794	1779459294	21756334.41
Tenès	110000	327800	711455917.7	711783717.7	8782211.084
Fouka	66000	196680	426873550.6	427070230.6	5429505.343
El Hamma	110000	327800	711455917.7	711783717.7	8483602.099
Cap Djine	55000	163900	355727958.8	355891858.8	4532188.941
Skikda	55000	163900	355727958.8	355891858.8	4615543.998
Souk Tleta	110000	327800	711455917.7	711783717.7	8513721.396
Mactaa	275000	819500	1778639794	1779459294	21738803.12
Corso	44000	131120	284582367.1	284713487.1	3625751.153
Cap Blanc	165000	491700	1067183877	1067675577	13043281.88
Alger-Oues	165000	491700	1067183877	1067675577	13565231.77
Cap Djinet	165000	491700	1067183877	1067675577	13596566.83
Béjaïa	16 5000	491700	10671 83877	1067675577	14112216.92

Annexes II

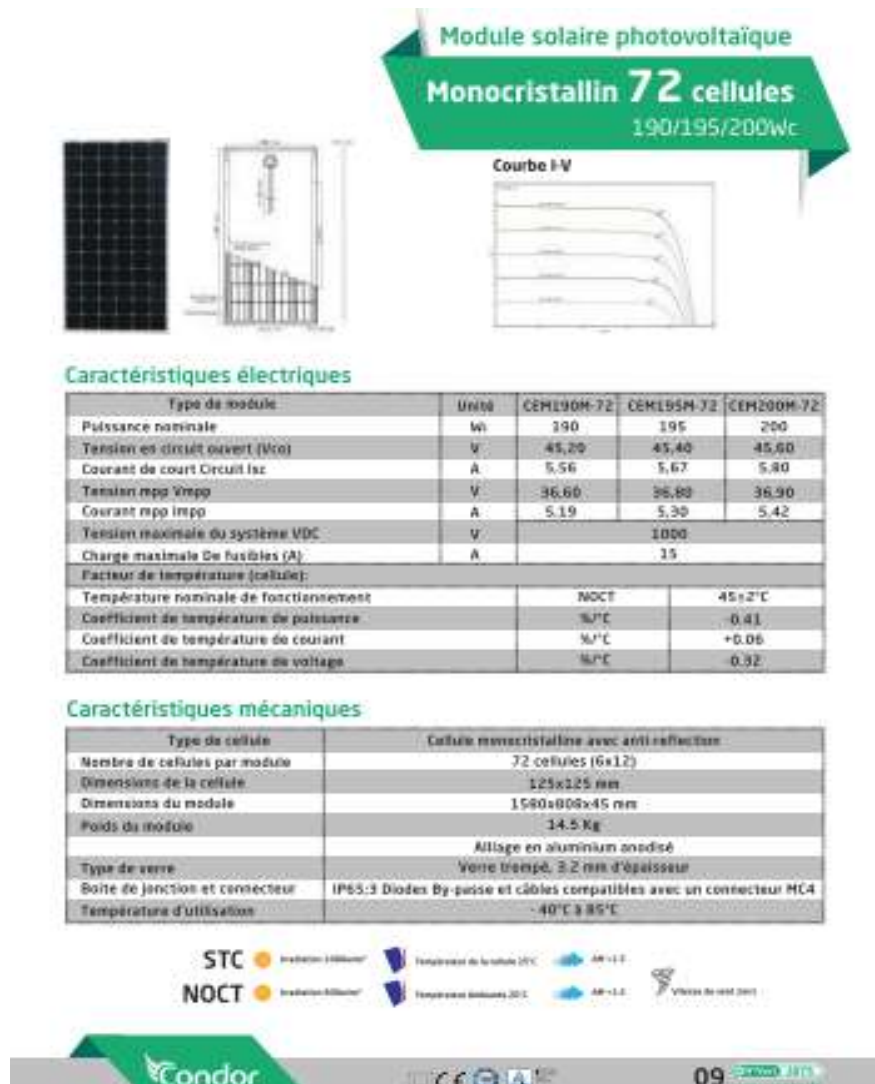


figure II.1 : caractéristiques de monocristallin 72 cellules 320 WC