

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique
Mémoire de Master

Présenté par :

SIDI ELEMINE KHATAR SID'AHMED ELBEKAYE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energies renouvelables

**Etude d'un système hybride à Énergie renouvelable
basé sur le stockage d'hydrogène**

Soutenu le 07/07/2022 devant le jury composé de :

Berrazouane	Sofiane	UMBB	Président
Doumane	Radia	UMBB	Examinatrice
Boubenia	Ahmed	UMBB	Encadreur

Année Universities: 2022/2023

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

♥ *Aux mémoires de mon père que DIEUX le tout puissant
l'accueil a sa paradis éternel et que son âme repose en paix* ♥

A ma chère mère

A mes frères et mes sœurs

A toute la famille KHATAR SID'AHMED ELBEKAYE

A mon encadreur Monsieur le docteur Ahmed BOUBENIA

A tous mes collègues et amis

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science

Et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien

Et la prospérité de l'humanité.

Qu'Allah, le tout majestueux vous préserve en bonne santé

Et vous accorde une longue vie pleine de dévotion et de bonheur

KHATAR SID'AMED ELBEKYE Sidi elemine

REMERCIEMENTS

J'adresse mes sincères sentiments de reconnaissance et de remerciement envers le bon DIEU, le clément et le miséricordieux, lequel nous a accordé la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Mes remerciements vont aussi à mon encadreur Monsieur Ahmed BOUBENIA qui a su par sa disponibilité, sa bienveillance et sa rigueur, m'encourager et m'orienter jusqu'à l'achèvement de ce travail pour m'avoir encadré tout le long de mon projet. Que Monsieur le docteur A. BOUBENIA retrouve ici, l'expression de mon profond respect et de ma reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent ensuite aux différents professeurs et personnels de L'université M'Hamed Bougara de Boumerdès pour leurs conseils, leurs remarques et surtout leurs critiques si objectives durant tout mon cycle.

Par ailleurs, je remercie tous les enseignants du département de Mécanique qui ont eu à m'enseigner.

En fin, tous mes remerciements à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste projet.

Résumé

Nous présentons dans ce mémoire une étude technico-économique d'un système innovant lié à la problématique de l'intermittence et du stockage des énergies renouvelables en utilisant le logiciel de simulation HOMER. L'installation PV/H2 est constituée du champ photovoltaïque (PV) alimente directement l'utilisateur et d'un électrolyseur (EL) produit des gaz (H2 et O2) avec les surplus d'énergie ; à l'inverse Lorsque la demande excède la capacité de la ressource renouvelable, une pile à combustible(ou FC pour Fuel Cell) est connectée. Elle régénère l'électricité stockée en recombinaison l'hydrogène et l'oxygène.

Mots clés :

Énergie Renouvelable, Système hybride, Photovoltaïque, Pile à combustible, Electrolyseur, HOMER Energie.

ملخص

نقدم هنا دراسة تقنية واقتصادية لنظام مبتكر مرتبط بمشكلة التقطع وتخزين الطاقات المتجددة باستخدام برنامج المحاكاة HOMER ، يتكون التركيب PV / H2 من المجال الكهروضوئي (PV) الذي يزود المستخدم مباشرة ومحلل كهربائي (EL) ينتج غازات (H2 و O2) من الطاقة الزائدة ؛ على العكس من ذلك ، عندما يتجاوز الطلب قدرة المورد المتجدد ، يتم توصيل خلية وقود (أو FC لخلية الوقود). يجدد انتاج الكهرباء المخزنة عن طريق إعادة الجمع بين الهيدروجين و الأكسجين.

الكلمات المفتاحية: النظام الهجين, طاقة كهروضوئية, خلية الوقود الهيدروجين, محلل كهربائي , هومر.

Abstract

We present here a technical-economic study of an innovative system related to the problem of intermittency and storage of renewable energy using the HOMER simulation software. The PV/H2 installation is composed of a photovoltaic (PV) field which supplies the user directly and an electrolyser (EL) which produces gases (H2 and O2) with excess energy; conversely, when the demand exceeds the capacity of the renewable resource, a fuel cell (FC) is connected. It regenerates the stored electricity by recombining hydrogen and oxygen.

Keys Words: Renewable Energies, hybrid system, PV, Fuel cell, Electrolyser , HOMER Energy

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Contextes énergétiques et Énergies renouvelables

I.1Contexte énergétique mondial.....	3
I.2Contexte énergétique national	4
I.3Sources d'énergies renouvelables	5
I.3.1 Energie Hydraulique.....	5
I.3.2Energie éolien	5
I.3.3L'énergie géothermie:.....	7
I.3.4Biomasse	7
A.Définition	8
B.Principe de fonctionnement.....	8
I.3.5Energie solaire	9
I.3.5.1Solaire thermique	10
I.3.5.2Solaire photovoltaïque	12
I.4L'énergie solaire dans le monde.....	13
I.5Conclusion.....	14

Chapitre II : Etat de l'art sur production, stockage, et utilisation de l'hydrogène

II.1 Introduction	15
II.2 Production de l'hydrogène	15
A.Vaporeformage	16
B La gazéification de la biomasse (en particulier du charbon de bois).....	17
C. Électrolyse de l'eau.....	18
II.3 Les technologies de stockage	19
A. Stockage d'hydrogène gazeux	20
B. Stockage d'hydrogène sous forme liquide	21
C. Stockage d'hydrogène sous forme solide.....	22
II.4Les risques encourus	23
II.5Le transport et la distribution	25
II.6Conclusion.....	26

Sommaire

Chapitre III : Modélisation de système production d'hydrogène

III.1 Introduction	28
III.2 Modélisation du système photovoltaïque	28
A. Modélisation du gisement solaire	28
B. Modélisation d'une cellule et du module PV	29
III.3 La modélisation de la pile à combustible	34
III.4 Electrolyseur d'eau	39
III.5 Stockage gaz	43
III.6 Conclusion	44

Chapitre IV : Dimensionnement et simulation du système étudié

IV.1 Introduction	46
IV.2 Utilisation du logiciel HOMER	46
IV.3 Création du système:	47
IV.4 Caractéristique de la région de Nouakchott	47
IV.4.1 Données géographiques	47
IV.4.2 Donnée météorologiques	48
A. Variation mensuelle de l'irradiation	48
B. Température moyenne	49
C. Profils de charge	50
IV.5 Caractéristiques techniques et économiques des composants utilisés:	51
IV.6 Dimensionnement et Optimisation	53
IV.7 Interprétation des résultats de simulation	54
IV.7.1 Système PV-Batterie	54
IV.7.2 Système PV- PAC	56
IV.7.3 Comparaison entre les deux systèmes	61
IV.8 Résultat de simulation	62
IV.9. Concluons	69
Conclusion générale	72
Références bibliographiques	73

Listes des figures

Figure 1: Répartition de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2015 en % [6] -----	4
Figure 2: L'évolution de la capacité éolienne mondiale [9] -----	6
Figure 3: Principe de fonctionnement d'une Eolienne [10] -----	7
Figure 4: Le fonctionnement d'une centrale à biomasse [12] -----	8
Figure 5: Flux reçu sur la terre -----	10
Figure 6: Le système complet de conversion de l'énergie solaire concentration -----	11
Figure 7: Origine de l'hydrogène produit dans le monde en 2011 -----	16
Figure 8: Dissociation de l'hydrogène en surface, diffusion dans le métal et formation de l'hydrure métallique [1]. -----	22
Figure 9: les différentes voies de synthèse de l'hydrogène [29] -----	25
Figure 10 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire -----	30
Figure 11: Modèle physique de la pile à combustible -----	35
Figure 12: Les opérations principales de HOMER -----	47
Figure 13: Description du système -----	47
Figure 14: Description du système -----	47
Figure 15: l'irradiation journalière moyenne pour chaque mois de l'année -----	49
Figure 16: Température moyenne mensuelle à la région de Nouakchott -----	49
Figure 17: Profil de charge mensuelle -----	50
Figure 18: Irradiation solaire mensuelle globale pour la région de Nouakchott -----	51
Figure 19: Variation journalier du profil de charge pour chaque mois -----	51
Figure 20: configuration du système PV-Batterie en fonction du coût net actuel. -----	54
Figure 21: production énergétique mensuelle du système PV-Batterie.. -----	54
Figure 22: Excès énergétique mensuelle pour le système PV-Batterie. -----	55
Figure 23: Energie photovoltaïque mensuelle produite par les panneaux photovoltaïques dans le système PV-Batterie -----	55
Figure 24: Production énergétique mensuelle de la batterie pour le système PV-Batterie -----	56
Figure 25: configuration choisit du système PV-PAC -----	56
Figure 26: production énergétique mensuelle du système PV-PAC -----	57
Figure 27: Excès énergétique mensuelle pour le système PV-PAC. -----	58
Figure 28: Energie photovoltaïque mensuelle produite par les panneaux photovoltaïques dans le système PV-PAC -----	58
Figure 29: Quantité d'hydrogène produite en fonction de l'énergie photovoltaïque du système PV-PAC. -----	59
Figure 30: Consommation énergétique mensuelle de l'électrolyseur pour le système PV.PAC -----	59
Figure 31: Quantité mensuelle d'hydrogène produite par l'électrolyseur pour le système PV- PAC -----	60
Figure 32: Production énergétique mensuelle de la pile à combustible pour le système PV- PAC. -----	60
Figure 33: la configuration optimale d'un système hybride renouvelable -----	62
Figure 34: la puissance de sortie des panneaux PV en un an avec la consommation et l'excès annuelle d'électricité. -----	63

Listes des Figures et Tableaux

Figure 35:La figure suivant montre l'état de charge de la batterie en un an-----	64
Figure 36: la sortie de l'onduleur -----	65
Figure 37:La production d'énergie solaire-----	65
Figure 38:Production de l'hydrogène par un an -----	66
Figure 39:Le fonctionnement de la pile à combustible -----	66
Figure 40:Résultats des coûts détaillés des composants du système et les paramètres de fonctionnement-----	69
Figure 41:Résultats des coûts détaillés des composants du système et les paramètres de fonctionnement-----	69

Listes des tableaux

Tableau 1 :Tableau de classification des capteurs solaires	12
Tabel 2:Principaux pays producteurs d'électricité d'origine solaire en 2018 [16]	13
Tabel 3:Tableau comparatif des 3 technologies [23]	19
Tabel 4:les technologies de réservoirs[23].....	21
Tabel 5 : Causes et mesures de conception pour éviter les fuites d'hydrogène	24
Tabel 6:Causes et mesures de conception pour éviter le mélange H2/O2	24
Table 7:Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque	32
Tabel 8:l'irradiation journalière moyenne pour chaque mois de l'année	48
Tabel 9:Température moyenne mensuelle à la région de Nouakchott	50
Tabel 10:composition du système PV-Batterie.	54
Tabel 11:Bilan énergétique du système PV-Batterie.....	55
Table 12:Coût de chaque composant du système PV-Batterie.....	56
Tabel 13: composition du système PV-PAC.....	57
Tabel 14:Bilan énergétique du système PA-PAC.	57
Tabel 15:Coût de chaque composant du système PV-PAC.	61
Tabel 16:Comparaison entre les systèmes.....	61
Table 17: Paramètres de fonctionnement de l'électrolyseur	67
Tabel 18:les paramètres relie au réservoir de l'hydrogène	68
Table 19:Emissions annuelles du système hybride	69



Introduction Générale

Introduction Générale

Les observations du changement climatique en cours montrent un réchauffement d'environ 0,8 °C de la température à la surface du globe depuis 1900, une modification du profil vertical de température, une augmentation de l'humidité atmosphérique, un réchauffement plus marqué à la surface des continents que des océans et très prononcé dans l'Arctique, caractérisé par un retrait des zones enneigées et englacées, une augmentation de la fréquence des vagues de chaleur et de l'intensité des précipitations les plus fortes... Toutes ces caractéristiques sont cohérentes avec les études théoriques de l'impact sur le climat d'une augmentation des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre, conduisant à un impact dominant des activités humaines sur l'évolution du climat global au cours des derniers cinquante ans [1]. Le réchauffement climatique est donc devenu un sujet préoccupant pour l'humanité et nous confronte à deux défis majeurs : le premier est de pouvoir répondre à la hausse de la consommation énergétique mondiale en lien avec l'augmentation de la population, le deuxième est de limiter l'impact de l'activité humaine sur le climat. Il est donc devenu indispensable de miser sur les énergies renouvelables pour limiter les émissions de gaz à effet de serre dans la production de l'énergie, de l'industrie et dans le transport...et etc. Mais la majorité de ces sources renouvelables est intermittente et ne peut être valorisée que localement. Le recours à un support de stockage chimique est donc incontournable, surtout dans le cas d'une utilisation massive de ces ressources. Le support futur le plus probable selon les scientifiques et les industriels sera incontestablement l'hydrogène. Vu que les sources d'énergie renouvelables et le cycle de l'hydrogène ne présentent aucun danger principal pour l'environnement, ce couple offrira sûrement la possibilité de résoudre les problèmes environnementaux et de réduire la dépendance vis-à-vis des carburants fossiles. Il permettrait le renforcement de l'utilisation des énergies renouvelables, en particulier solaire et l'énergie éolienne, en permettant le stockage de ces énergies sous une forme chimique pour une utilisation découplée du lieu et du temps de l'offre. Dans une perspective d'introduction de l'hydrogène comme vecteur énergétique dans le respect total des exigences du développement durable, plusieurs possibilités sont envisagées et profondément étudiées, certaines sont arrivées à maturité technologique et d'autres sont encore au stade du développement. Deux filières principales de production massive et propre de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables sont : La production de l'hydrogène par thermolyse de l'eau ou par conversion thermochimique de la biomasse peut répondre à une demande limitée et locale de l'hydrogène. La voie de l'électrolyse de l'eau reste la plus prometteuse dans la mesure où cette production jouera le rôle de stockage des énergies renouvelables intermittentes [2]. Dans ce contexte, est parvenu notre étude, Il est orientée vers une source renouvelable photovoltaïque (PV) couplés à un système de stockage de l'hydrogène est proposé comme solution à la fois non polluante et renouvelable.

Introduction Générale

Le développement des énergies solaire, éolienne est à l'ordre du jour mais leur caractère intermittent occasionne des difficultés d'ajustement de l'offre et de la demande (elle dépend de la météorologie et du régime des vents, de l'ensoleillement pour le photovoltaïque). Il faut passer d'un système qui produit l'électricité à la demande, de manière centralisée, à un système dans lequel la production est diffuse sur tout le territoire et non calquée sur une consommation. Cela entraîne des problèmes de stabilité des réseaux [3] et de stockage d'énergie car les énergies renouvelables produisent de l'électricité même quand il n'y a pas de consommateur. Cela illustre le fait que le système ne fonctionne pas précisément comme on le voudrait et qu'il peut conduire à un gaspillage sur nos réseaux énergétiques. Pour éviter le gaspillage des surplus de production d'électricité, on peut envisager la synthèse d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Le dihydrogène ainsi obtenu peut avoir différents usages:

- être réutilisé dans l'industrie ;
- être injecté dans les réseaux de gaz de ville, le « power to gaz », ce qui est une manière de stocker de l'énergie éolienne ou photovoltaïque sous forme gazeuse [4] ;
- alimenter des véhicules électriques

L'organisation du présent mémoire s'articule sur quatre chapitres. Le Chapitre 1 du mémoire est tout d'abord consacré au potentiel des énergies renouvelables. Plus particulièrement, les technologies de production photovoltaïque. Le second chapitre est consacré à la production, stockage, et utilisation de l'hydrogène telles que ; le stockage gazeux sous pression, le stockage cryogénique sous forme liquide, le stockage solide dans des hydrures et des matériaux adsorbants. Ainsi que les problèmes liés à la sécurité du stockage. Le chapitre 3, constitue le cœur du travail; il est consacré à la modélisation de l'électrolyseur, du générateur photovoltaïque et de la pile à combustible. Le chapitre 4 sera dévolus complètement aux résultats des simulations du système PV-PAC (panneau photovoltaïque-pile à combustible) et PV-Batterie avec discussion de toutes les figures présentées avant qu'une conclusion ou les observations le plus remarquable viendra finaliser ce travail de master.

CHAPITRE

I Contextes énergétiques et Énergies renouvelables

I. Chapitre I : Contextes énergétiques et Énergies renouvelables

I.1 Contexte énergétique mondial

À la fin du xviii^e siècle, le monde consommait moins de 250 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep), essentiellement sous forme de bois et plus accessoirement sous forme d'énergie éolienne (moulins et bateaux à voile) ou hydraulique. La révolution industrielle du début du xix^e siècle est aussi celle des énergies fossiles. D'abord la révolution du charbon qui, couplé à la machine à vapeur, permet l'industrie moderne et le chemin de fer, et qui donne à l'Angleterre la suprématie économique, au temps du Rule Britannia (chanson écrite pour célébrer la puissance navale et économique de l'Angleterre). Le xx^e siècle est, dans cette perspective, celui du pétrole et de l'automobile, éléments constitutifs initiaux de la puissance économique des États-Unis et de l'American way of life. De 1900 à 1950, la consommation mondiale d'énergie double, passant de 1 à 2 milliards de tep (Gtep), puis c'est l'accélération et la multiplication par 6 entre 1950 et 2010. Il n'aura fallu que soixante ans pour passer de 2 à 12 Gtep : un instant seulement à l'échelle de l'histoire humaine [1]. Aujourd'hui, la production mondiale d'énergie est réalisée à 74 % à partir de combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz), à 20 % par les énergies renouvelables (hydraulique, biomasse, solaire, éolien) et à 6 % par le nucléaire [5].

Pour un total de production mondiale d'énergie de 13 647 Mtep en 2015, 81,4 % équivalent à 11 109 Mtep proviennent essentiellement des combustibles fossiles (charbon et hydrocarbures), qui sont la principale source d'énergie qui sont toujours omniprésentes dans le mix mondial. On constate, par ailleurs, que 86,3% de la production mondiale d'énergie primaire a été basée sur des ressources non renouvelables, avec 4,9 % équivalent à 669 Mtep d'énergie nucléaire, en raison de son usage exclusif pour la production d'électricité, qui ne représente que 14 % de la consommation d'énergie mondiale. Quant aux énergies renouvelables et malgré une forte croissance et développement ces derniers temps, l'éolien et le solaire, sous leur forme moderne, apportent une contribution négligeable par rapport aux combustibles fossiles de l'ordre de 11,2 % équivalent à 1 528 Mtep [6].

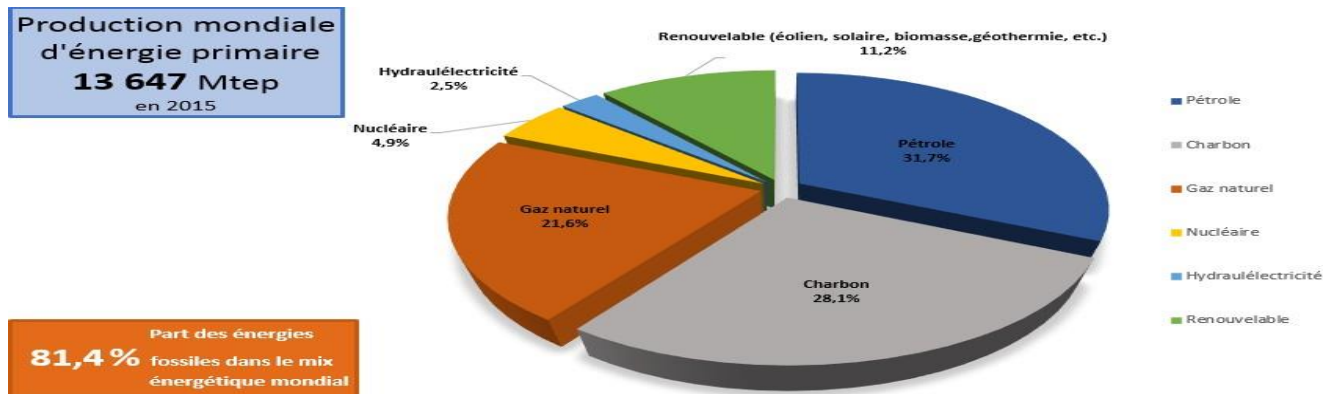


Figure 1: Répartition de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2015 en % [6]

I.2 Contexte énergétique national

La Mauritanie a mis en place une politique énergétique et environnementale permettant de contribuer à la lutte contre les changements climatiques. Cette politique s'articule entre autres sur la promotion des énergies renouvelables. La Mauritanie vise depuis plusieurs années à réduire fortement sa dépendance vis-à-vis des ressources d'énergie fossiles en valorisant le mix énergétique dans la production d'électricité qui était en grande partie d'origine thermique diesel (fuel et gasoil). Elle a mis en place une politique énergétique et environnementale permettant de contribuer à la lutte contre le changement climatique. La stratégie mise en place par le gouvernement au cours de ces dernières années vise à :

- ✚ Augmenter la capacité de production sur la base de ressources locales, principalement le gaz naturel et l'hydroélectricité
- ✚ Développer le réseau électrique national et régional et les réseaux d'interconnexion
- ✚ Mettre en œuvre des solutions décentralisées dans les régions reculées et isolées
- ✚ Renforcer le rôle des énergies renouvelables dans le mix énergétique

Cette dernière stratégie a permis, en dehors de l'hydraulique centralisée (Barrage de Manantali de l'OMVS) l'intégration des énergies renouvelables solaire et éolienne à grande échelle, dont les potentialités considérables étaient inexploitées. Parmi les projets réalisés : la mise en place de plusieurs centrales d'énergie renouvelables notamment la centrale solaire photovoltaïque Sheikh Zayed de 15 MWc mise en service en 2013 et la centrale solaire photovoltaïque de Toujounine d'une puissance de 50 MWc mise en service en 2017, ainsi que l'hybridation au solaire de la centrale de Kiffa (4,8 MW Diesel/1,3 MW PV).

Les centrales d'énergie éolienne ont aussi leur part dans le mix énergétique par la mise en service de parcs éoliens de 31,5 MWc à Nouakchott, de 4,4 MWc à Nouadhibou et de 0,3 MWc à Chami. Un parc éolien d'une puissance 100 MWc est en phase d'achèvement à Boulénouar entre Nouakchott et Nouadhibou [7].

La Mauritanie se caractérise par un taux d'électrification urbain TEU de 65% (moins de 75% pour Nouakchott) et un taux d'électrification rural TER de 5%. La politique du gouvernement vise à atteindre dans les prochaines années un TEU à plus de 80% et un TER à plus de 40%.

Afin d'améliorer l'accès à l'électricité, plusieurs actions visent à développer le réseau électrique par :

- L'électrification des quartiers périphériques de Nouakchott, Nouadhibou ainsi que plusieurs autres villes du pays
- La construction de nouvelles lignes HT 225 kV sont en cours de construction entre Nouakchott et Nouadhibou, d'une part, et entre Nouakchott et Zouerate, passant par Akjoujt et Atar d'autre part
- Une autre ligne HT 225 kV reliera Nouakchott et Keur Macène, sur la frontière avec le Sénégal, tandis que la construction d'une ligne traversant tout le pays vers l'Est jusqu'à la ville de Néma est actuellement à l'étude.

Ces lignes d'interconnexion permettront d'optimiser et de sécuriser l'approvisionnement du pays en énergie électrique et améliorer l'accès à l'électricité en milieu urbain et rural qui reste faible [8].

I.3 Sources d'énergies renouvelables

L'énergie renouvelable peut être utilisée lorsqu'une ressource énergétique se régénère naturellement à une vitesse comparable avec celle de son utilisation. Le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux sont ainsi des sources d'énergie renouvelables. Les énergies pétrolière et nucléaire n'appartiennent pas à cette classe puisque la réserve mondiale en pétrole et en uranium est limitée.

I.3.1 Energie Hydraulique

Énergie hydroélectrique exploite l'énergie potentielle des flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins, etc.). Successions de transformations des énergies, L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur.

I.3.2 Energie éolien

La première idée de produire l'énergie électrique par le vent est née en 1802, mais ce n'est qu'en 1850 que les premiers aérogénérateurs ont vu le jour [9]. En 1887-1888, Charles F. Brush, un scientifique américain de Cleveland en Ohio, a construit la première turbine éolienne capable de produire de l'électricité ayant un diamètre rotorique de 17 mètres et est composée de 144 pales en cèdre. Elle était énorme pour une puissance générée l'ordre de 12 kW, seulement. La figure 1.1. Illustre l'évolution de la capacité de production d'énergie éolienne mondiale en progressant de l'année 2000 jusqu'en 2015. Ces statistiques montrent la progression exponentielle de ce type de production d'énergie en démarrant de 17.4GW en 2000 jusqu'à la production de 433GW en 2015, soit une multiplication par 25 fois environ. Ce qui montre la forte demande en ce type d'énergie [10].

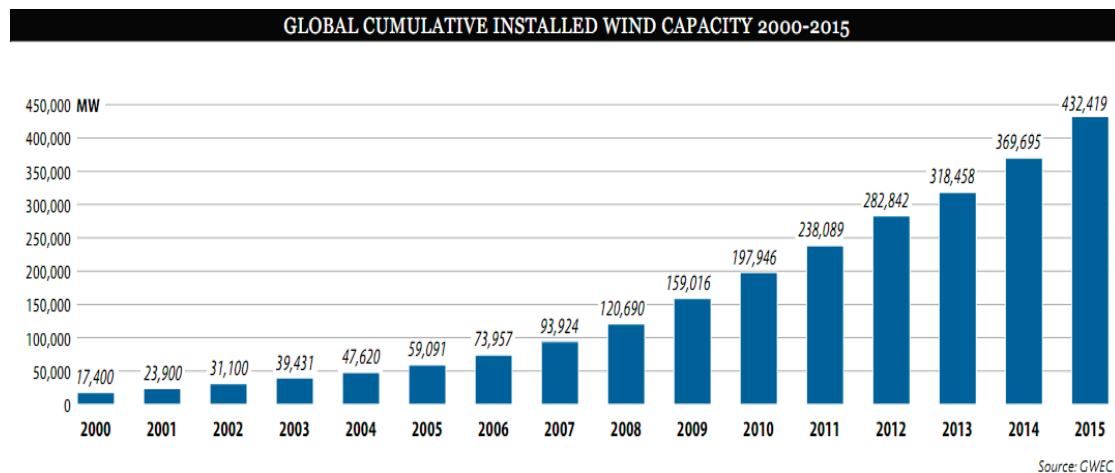


Figure 2: L'évolution de la capacité éolienne mondiale [9]

L'éolien constitue un domaine de recherche scientifique actif qui mobilise des moyens de recherche importants. Cela nécessitera encore des moyens accrus dans le futur, au regard des ambitions affichées dans les politiques énergétiques aux niveaux nationaux, européen, et même mondial. L'éolienne elle-même fait l'objet de programmes scientifiques visant à l'amélioration des performances aérodynamiques en conditions naturelles, et de sa résistance aux processus de vieillissement. Son principe de fonctionnement est illustré dans la figure

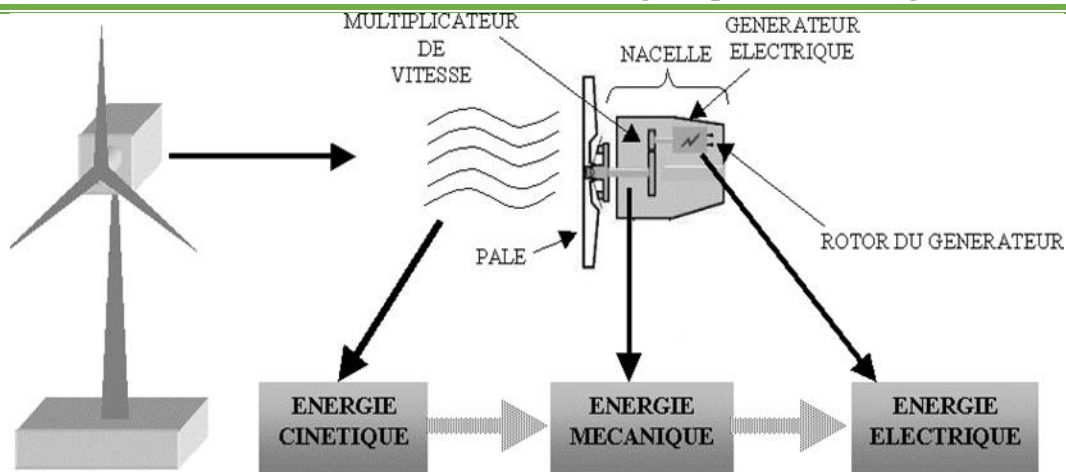


Figure 3: Principe de fonctionnement d'une Eolienne [10]

I.3.3 L'énergie géothermie:

La géothermie est d'origine grecs, composée de deux mots ("Gê " signifie la terre et "Thermie" signifie la chaleur) [11]. La géothermie s'intéresse à l'exploitation des sources d'eau chaude en profondeur. Elle constitue l'une des principales ressources d'énergie renouvelable dans le monde. Son potentiel est considérable pour la production de chaleur ou d'électricité. Il y a deux types principaux de la géothermie dans le monde

✚ La géothermie haute énergie : Elle concerne les gisements des zones continentales actives où les températures sont supérieures à 150 °C. Elle est destinée principalement à la production d'électricité;

✚ la géothermie basse énergie : Pour les gisements des zones des plates-formes continentales stables, recouvertes de terrains sédimentaires tels que la température comprise entre 30 °C et 150 °C. Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage de serres.

On distingue trois grands types de centrales électriques :

- Centrale conventionnelle
- ✓ Centrale à vapeur sèche, vaporisation directe.
- ✓ Centrale à vapeur flash, vaporisation éclaircie.
- Centrale à cycle binaire

I.3.4 Biomasse

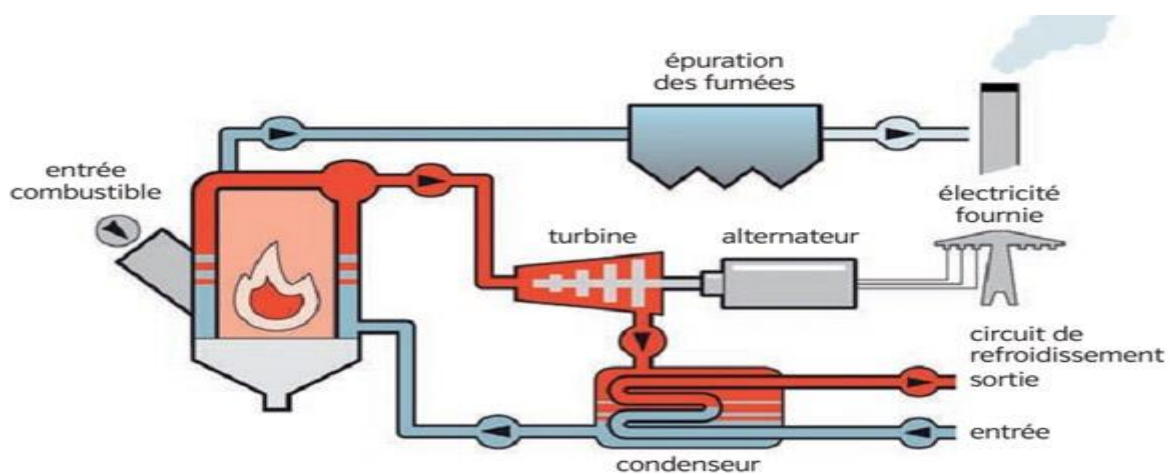
A. Définition

Le terme général de biomasse englobe des produits d'origines très variées (forestière, agricole, marine, etc.). Principale source d'énergie renouvelable, elle présente de nombreux avantages : gisement bien réparti, abondant, rapidement mobilisable. En outre, le CO_2 libéré lors de sa valorisation est réabsorbé par les végétaux lors de la photosynthèse. Son utilisation à des fins énergétiques nécessite cependant sa transformation préalable. Trois grandes voies sont possibles : physico-chimiques (huiles végétales), biochimiques (fermentation, hydrolyse, digestion anaérobie) et thermochimiques. On distingue trois grandes familles principales de ces matériaux d'origine biologique qui sont employés comme combustibles pour la production de chaleur, d'électricité ou de carburants :

- ✚ Les bois énergie ou biomasse solide
- ✚ Le biogaz
- ✚ Les biocarburants

B. Principe de fonctionnement

En 2018, la production d'électricité à partir des bioénergies représente 518.5 TW/h soit 1.9% de la production mondiale. Les trois plus grands producteurs d'électricité à partir des bioénergies, les États-unis, La chine, Brésil [12]. Le principe de l'action de la biomasse est sur un plan de centrale à biomasse, comme le montre la figure suivante : Figure.



Lit Fluidisé Circulant + biomasse : une centrale électrique dès 2014.

Figure 4: Le fonctionnement d'une centrale à biomasse [12]

Après avoir brûlée la biomasse, une température élevée est produite ce qui transforme l'eau en vapeur, puis l'électricité est produite grâce aux turbines qui fournissent de l'énergie au générateur.

I.3.5 Energie solaire

L'éclairement solaire peut être considéré comme un gisement ou une ressource. Plusieurs voies de conversion énergétique sont possibles pour l'exploiter: la conversion directe en énergie électrique par cellule photovoltaïque; la conversion directe en énergie thermique par capteur solaire thermique; la conversion thermodynamique en énergie électrique, associant capteur solaire thermique, turbine ou moteur thermique et générateur électrique; et la conversion en énergie chimique par voie photochimique (production d'hydrogène par photolyse de l'eau).

La lumière solaire est composée de toute sorte de rayonnement, de couleurs différentes, caractérisée par différente longueur d'onde. La plus grande quantité d'énergie est apportée par les ondes visibles (lumière blanche qui est la superposition de toutes les couleurs). Certaines ondes sont absorbées partiellement ou totalement par les particules de l'atmosphère (les molécules d'ozone absorbent une partie de l'ultra-violet).

Le rayonnement solaire est une énergie produite par le soleil à la suite de réactions de fusion thermonucléaire qui dégage une très grande quantité d'énergie, source de la plupart des énergies disponibles sur Terre et exploitable pour la production d'électricité. Ce rayonnement constitue 99,97 % des sources de chaleur de la terre.

On distingue quatre types de rayonnement solaire: global, direct, diffus et réfléchi.

L'irradiation globale (incidente) inclinée est constituée de trois composantes (ou deux si le plan est horizontal) :

- ✚ L'irradiation directe ($\text{kWh/m}^2/\text{j}$), G_{bi} : provient directement du soleil. Cette composante est nulle lorsque le soleil est caché par des nuages ou par un obstacle (bâtiment, masque lointain).

- ✚ L'irradiation diffuse ($\text{kWh/m}^2/\text{j}$), G_{di} : correspond au rayonnement reçu de la voûte céleste, hormis le rayonnement direct.

- ✚ L'irradiation réfléchie ($\text{kWh/m}^2/\text{j}$), G_r : correspond au rayonnement renvoyé par le sol et l'environnement. Cette composante est nulle sur un plan horizontal

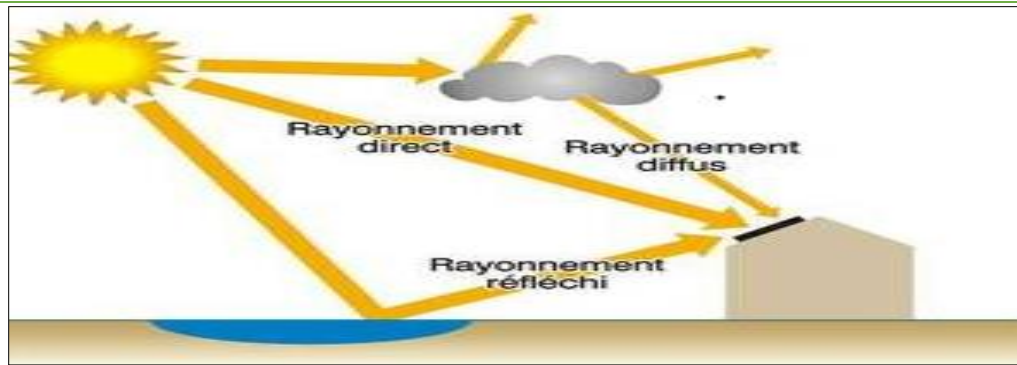


Figure 5: Flux reçu sur la terre

L'énergie solaire active, omniprésente aujourd'hui, permet des applications différentes :

- La production de chaleur : le solaire thermique.
- La production d'électricité : le solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire est écologique, gratuite et rentable à la condition que l'on possède une installation solaire composée de capteurs hauts performances et de composants adaptés.

I.3.5.1 Solaire thermique

Le solaire thermique est utilisé pour fournir de la chaleur pour les processus industriels, principalement dans les industries agroalimentaires, textiles et chimiques. La conception de ces installations est réalisée en fonction de trois critères principaux : le niveau de température requis (et donc de la technologie des capteurs solaires), la coïncidence temporelle des besoins de chaleur et des apports solaires et le taux d'économie d'énergie visé. L'énergie solaire thermique peut être valorisée pour assurer la production de froid, notamment dans le cadre de la climatisation solaire. La chaleur produite par les capteurs solaires est alors dirigée vers une machine thermique, tri-thermique à absorption ou adsorption qui, au travers d'un cycle thermodynamique, va transformer l'énergie calorifique en énergie frigorifique [1].

Le terme captage solaire désigne le processus de collecte de l'énergie solaire. Le captage de l'énergie solaire se fait par des différents dispositifs. Parmi les grandes familles de capteurs, on trouve: les capteurs plans non vitrés, les capteurs plans vitrés, les capteurs sous vide et les capteurs à concentration. Les capteurs plans ne peuvent généralement pas porter les fluides caloporteurs à très haute température. En revanche, il est possible d'utiliser des capteurs par concentration. Ces centrales sont notamment équipées de miroirs paraboliques qui suivent quotidiennement le trajet du soleil. Les rayons sont utilisés pour chauffer à très haute température un liquide et ainsi produire de l'électricité.

Les centrales solaires thermodynamiques peuvent, en stockant le fluide dans un réservoir, prolonger le fonctionnement des centrales en question plusieurs heures après le coucher du soleil [13].

La figure suivante montre les principaux sous-systèmes (composants) d'un dispositif de conversion de l'énergie solaire concentrée. Rappelons qu'une centrale solaire thermique (ou thermodynamique) transforme la chaleur absorbée par le récepteur solaire en électricité via un cycle thermodynamique utilisant la vapeur comme fluide caloporteur (l'eau se vaporise à la source chaude puis se condense à la source froide) ou un gaz permanent comme l'air ou l'hélium.

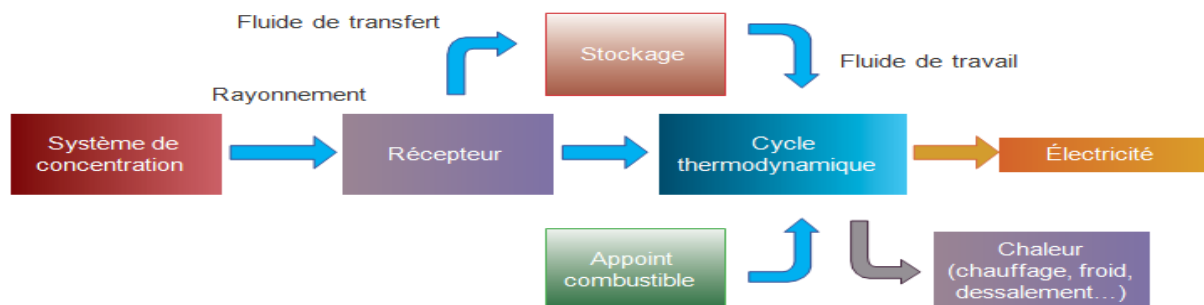
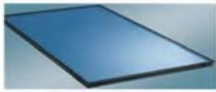
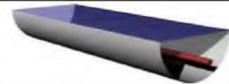
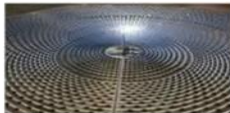


Figure 6:Le système complet de conversion de l'énergie solaire concentration

Dans les tableaux suivants on trouve les différents types des capteurs :

Tableau I 1:Tableau de classification des capteurs solaires

	Type de capteur		Rapport de concentration pour rayonnement direct	Intervalle Température T(K)
	Nom	Diagramme schématique		
Stationnaire	Capteur à absorbeur plan		$C \leq 1$	$300 < T < 360$
	Tube sous vide		$C \leq 1$	$300 < T < 460$
Un axe	Réflecteur parabolique composé		$1 \leq C \leq 1$	$340 < T < 510$
			$5 \leq C \leq 15$	$340 < T < 560$
	Réflecteur Parabolique		$15 < C \leq 40$	$340 < T < 560$
	Réflecteur Fresnel		$10 < C < 40$	$340 < T < 540$
	Réflecteur cylindro-Parabolique		$10 < C < 50$	$340 < T < 540$
Deux axes	Réflecteur disque parabolique		$100 < C < 1000$	$340 < T < 1200$
	Réflecteur sphérique		$100 < C < 300$	$340 < T < 1000$
	Champs d'Héliostat		$100 < C < 1500$	$340 < T < 3000$

I.3.5.2 Solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie [14]. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la

température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [15].

L'effet photovoltaïque

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque. Lors de l'absorption de la lumière, la génération des paires électron-trou ainsi que la séparation de ces porteurs de charges constituent un processus important non seulement pour les mesures et la détection de lumière (photo détecteurs) mais aussi pour la conversion de la lumière en énergie électrique (cellules solaires).

Technologie de cellules PV

Le silicium occupe une place prédominante au sein de l'industrie photovoltaïque grâce à ces nombreux avantages : disponibilité, qualités photovoltaïques assurant au final un bon rendement de conversion, non toxique. Enfin, il est aisé de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice cristalline des atomes dopants tels que le Bore (induisant un dopage de type P) et le Phosphore (induisant un dopage de type N).

Le silicium se présente sous différentes formes dont les plus répandues sont le silicium polycristallin, le silicium monocristallin et le silicium amorphe.

I.4 L'énergie solaire dans le monde

En 2019, près de 115 GW de panneaux photovoltaïques ont été installés dans le monde, et la puissance installée mondiale en matière de solaire photovoltaïque s'élève en 2019 à 627 GW.

Les trois plus grand pays produire l'électricité à partir la solaire photovoltaïque sont la chine, Etat - unis, japon selon le tableau suivante :

Tabel 2:Principaux pays producteurs d'électricité d'origine solaire en 2018 [16]

Pays	Puissance (TW/h)	national (%)
Chine	90.6	1
Etats-Unis	59.5	1
Allemagne	53.9	9

I.5 Conclusion

A travers notre étude de ce chapitre, nous concluons que les énergies renouvelables ont une grande importance et Quoi qu'il arrive, sont et seront nécessaires (épuisement des ressources fossiles, changement climatique...et etc.).Chaque type d' (EnR) à caractéristiques distinctives et un principe de fonctionnement qui diffère de l'autre; ce qui fait la plupart des pays développés à en dépendre pour produire de l'électricité et répondre à leurs besoins, Selon les capacités disponibles.

CHAPITRE

II

Etat de l'art sur production,
stockage, et utilisation de l'hydrogène

II. Chapitre II : Etat de l'art sur production, stockage, et utilisation de l'hydrogène

II.1 Introduction

L'hydrogène est l'élément le plus simple, le plus petit et le plus léger du tableau périodique ainsi que l'élément le plus abondant de l'univers. Il se trouve cependant rarement à l'état pur mais est presque toujours lié à d'autres éléments (comme l'oxygène par exemple pour former l'eau H_2O), ce qui nécessite l'utilisation de procédés techniques pour les séparer. Habituellement rencontré sous forme gazeuse, l'hydrogène se liquéfie à très basse température (-253 Celsius). En raison de sa faible densité, il est habituellement mis sous pression ou liquéfié pour le stockage et le transport. Sa liquéfaction augmente de 800 fois sa densité. Doté d'un plus fort potentiel énergétique que l'essence et les autres carburants, l'hydrogène peut être produit à partir de nombreuses sources d'énergie telles que la biomasse, l'énergie éolienne, solaire, hydroélectrique ou nucléaire et les carburants fossiles décarbonisés ; cette polyvalence lui confère un avantage indéniable. Sans odeur, sans couleur et non toxique, ce gaz dont la combustion n'entraîne aucune émission de carbone est considéré par plusieurs comme le vecteur d'énergie le plus prometteur pour le futur, d'autant plus qu'il est inépuisable. Parmi les autres avantages de l'hydrogène, mentionnons qu'il est facilement stockable et que ses utilisations possibles sont multiples. Il peut servir entre autres pour le chauffage industriel, le transport, l'alimentation d'appareils de manutention comme les chariots élévateurs dans l'industrie, etc. L'hydrogène est omniprésent dans les sources d'énergie fossile sous forme de composés carbone-hydrogène (hydrocarbures). Plus la source contient d'atomes d'hydrogène par rapport au nombre d'atomes de carbone (comme dans le méthane CH_4 , principal composé du gaz naturel), plus faible sera la quantité de CO_2 produite lors de la combustion et conséquemment plus faibles seront les émissions de GES dans l'atmosphère ; dans le cas du pétrole et du gaz diesel, la proportion d'atomes d'hydrogène est plus petite, ce qui entraînera plus de GES lors de la combustion [17].

Dans ce qui suit nous présentons les systèmes de production et stockage de l'hydrogène. Ainsi que leur transport et la distribution.

II.2 Production de l'hydrogène

Le nom hydrogène vient des deux mots : hydro = eau, et gène = générateur, donc le mot hydrogène signifie « générateur d'eau », c'est l'élément le plus abondant dans l'univers (Il compose 75% de la masse de toute la matière dans les étoiles et les galaxies.)[18]. L'hydrogène ne se trouve pas à l'état

natif sur Terre et il faut donc le produire à partir de ressources primaires telles que les hydrocarbures, la biomasse ou bien l'eau. L'hydrogène produit aujourd'hui pour les usages industriels est issu des hydrocarbures par différents procédés comme le vaporeformage du gaz naturel (48 % de la production mondiale), l'oxydation partielle des hydrocarbures liquides (30 % de la production mondiale) ou la gazéification du charbon (18 % de la production mondiale). Seuls 4 % de l'hydrogène produit au monde provient de la décomposition de l'eau par un procédé d'électrolyse.

Fig. Origine de l'hydrogène produit dans le monde en 2011

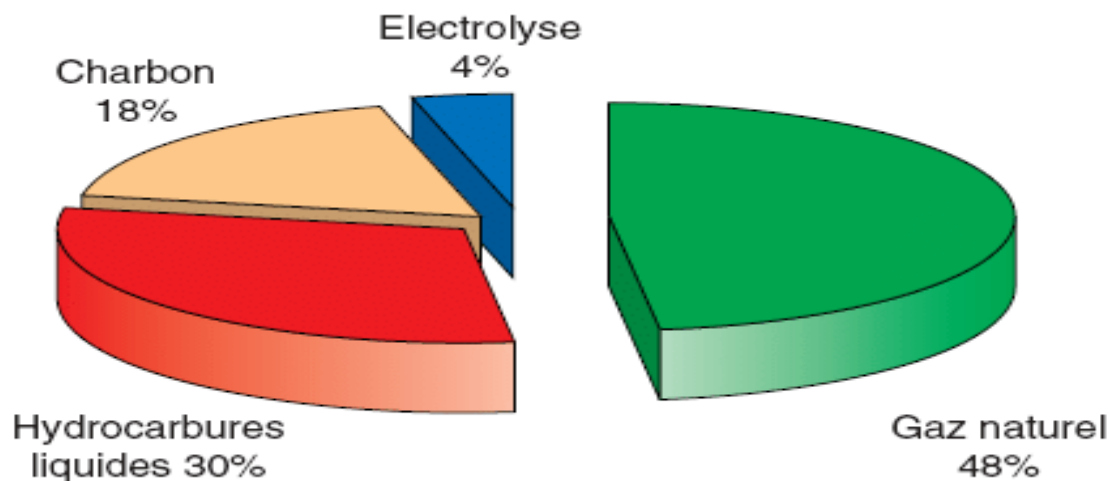


Figure 7: Origine de l'hydrogène produit dans le monde en 2011

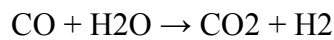
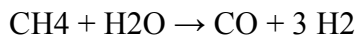
Aujourd'hui, 95 % de l'hydrogène est fabriqué à partir de sources d'énergies fossiles (gaz naturel, pétrole) et de bois, on distingue trois grands procédés de production d'hydrogène :

A. Vaporeformage

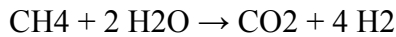
Le vaporeformage de combustibles fossiles est la technique de production d'hydrogène la plus répandue et la solution la moins coûteuse. Cette réaction chimique sépare les molécules d'hydrocarbures avec de la vapeur d'eau, de la chaleur et un catalyseur. On obtient alors un mélange contenant de l'hydrogène et du CO₂.

Le vaporeformage (en anglais : Steam Methane Reforming ou SMR) est la méthode de production la plus utilisée. Si l'on part de méthane, celui-ci réagit à haute température (700-1100 °C) avec de l'eau en présence d'un catalyseur à base de nickel pour donner de l'hydrogène et du monoxyde de carbone (réaction consommant de l'énergie, 206 kJ/mole de méthane) qui lui-même au contact de l'eau

produit du dioxyde de carbone et à nouveau de l'hydrogène (réaction exothermique dégageant 41 kJ/mole).



Le bilan de ces deux réactions est donc, dans le cas du méthane :



Ainsi, avec cette réaction, pour un kilogramme d'hydrogène produit, 5,5 kg de dioxyde de carbone sont en principe émis. En pratique, compte tenu du rendement thermodynamique de la réaction, ce sont de 7 à 10 kg de dioxyde de carbone qui sont émis par kilogramme d'hydrogène produit. La réaction inverse, où l'hydrogène réagit avec du monoxyde ou du dioxyde de carbone pour produire du méthane et de l'eau, s'appelle la méthanation. Si l'on part de charbon, la distillation de la houille (qui contient du carbone mais aussi des hydrocarbures adsorbés) produit un mélange d'hydrogène, de méthane (qui lui-même peut être converti par la réaction supra), de monoxyde de carbone (idem) et autres : c'est-à-dire l'ancien « gaz de ville », et évidemment du coke [19].

B. La gazéification de la biomasse (en particulier du charbon de bois)

La production d'hydrogène à partir de la biomasse repose principalement sur le procédé de gazéification thermique par lequel des composés organiques tels que le bois, les produits agricoles, les déchets urbains, se décomposent principalement en hydrogène et monoxyde de carbone. Le terme gazéification décrit le processus thermochimique se déroulant à température élevée (800-1100°C) entre la biomasse et un réactif gazeux (air, oxygène, vapeur d'eau) pour produire un gaz de synthèse riche en CO et H₂. La différence par rapport à la combustion se situe dans la quantité d'oxygène utilisée (oxygène de l'air, oxygène de la vapeur) qui n'est pas en quantité suffisante pour conduire à l'oxydation totale de la biomasse (combustion) [20]. Le procédé de production d'hydrogène par gazéification de la biomasse comporte quatre principales étapes [21] :

- ✚ Production du gaz de synthèse,

- ✚ Purification du gaz de synthèse par élimination des impuretés (H₂S, NH₃, ...),

Réaction de water-gas-shift (WGS) en vue de convertir le monoxyde de carbone contenu dans le gaz de synthèse en hydrogène en présence de la vapeur d'eau,

- ✚ Purification et production d'hydrogène à grande pureté.

C.Électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau ne représente actuellement que quelques pour-cent de la totalité de l'hydrogène produit. Néanmoins, comme elle est un mode de production a priori propre qui fournit de l'hydrogène de pureté élevée, elle est de ce fait du plus haut intérêt pour des applications telles que les piles à combustible. Actuellement, des électrolyseurs de petite capacité, typiquement de 1 à 100 kW, sont développés, parallèlement à l'électrolyse industrielle à forte puissance (unités pouvant aller jusqu'à plusieurs mégawatts) utilisée en secours d'autres moyens de production d'hydrogène ou encore pour stocker les excédents d'électricité (barrage de l'usine d'Assouan en Égypte). L'électrolyse de l'eau est un procédé électrochimique permettant, grâce à de l'énergie électrique, de décomposer de l'eau en hydrogène et oxygène, selon les deux réactions chimiques ayant lieu séparément à l'anode et à la cathode :

✓ À l'anode : $\text{H}_2\text{O} + \text{électricité} \rightarrow 2\text{H}^+ + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^-$

✓ À la cathode : $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$

La réaction globale d'électrolyse est donc :

✓ $\text{H}_2\text{O} + \text{électricité} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ (10)

Les électrodes sont séparées par un électrolyte conducteur d'ions qui permet des transferts ioniques entre les électrodes. Au cours de ce procédé, l'énergie électrique apportée au système est transformée en énergie chimique sous forme d'hydrogène [22].

Actuellement, il existe 3 principales technologies d'électrolyseurs sur le marché : alcalines, PEM (Proton Exchange Membrane) et SOEC (Solid Oxyde Electrolyser Cell). La première est une technologie mature et largement diffusée dans l'industrie. La seconde, plus récente, est de plus en plus répandue. La dernière (SOEC), fonctionnant à haute température, n'est pas sortie des laboratoires. Elle se différencie principalement par la substitution d'une partie de l'électricité nécessaire à la dissociation de l'eau par de la chaleur. L'efficacité énergie chimique/énergie électrique se trouve ainsi améliorée [23].

Tabel 3:Tableau comparatif des 3 technologies [23]

		Alcalin			PEM			SOEC		
Anode		$4\text{HO}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$			$\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^-$			$2\text{O}^{2-} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{e}^-$		
Cathode		$4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2 + 4\text{HO}^-$			$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$			$\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$		
Electrolyte		Electrolyte liquide (KOH ou NaOH)			Polymère solide			Oxydes céramiques solides		
Electrodes		Electrodes Ni/Fe			Métaux nobles (Pt, Ir...)			Céramique dopé Ni		
Pureté H ₂	%	99,50%			99,95%			99.4		
Démarrage à froid		10- 20 minutes sauf si maintien à température			< 10 min					
Débit maximal d'H ₂	Nm ³ /h	0,25 à 750			0,01 à 240			0,1 à 1		
Puissance électrique	kW	Environ 1,25 à 3 800			Environ 0,05 à 1 200			Environ 0,5 à 5		
Pression	Bar	1 à 50			1 à 80			5 à 30		
Température	°C	60 à 90			55 à 80			600 à 800		
		Actuel	2020	2030	Actuel	2020	2030	Actuel	2020	2030
Rendement de conversion Electricité -> H ₂ (PCS)	%	70%	75%	79%	70%	78%	84%	-	-	100 %
Avantages		Technologie mature Prix			Rapidité de variation de charge et démarrage à froid Large plage de fonctionnement compacité			Rendement élevé Réversibilité possible : fonctionnement en mode pile à combustible		
Inconvénients		Réponse dynamique moins rapide que le PEM mais amélioration en cours Utilisation de produit corrosif (KOH/NaOH)			Durée de vie limitée Technologie récente Prix élevé Recours à des métaux rares			Loin du stade commercial Durée de vie		

II.3 Les technologies de stockage

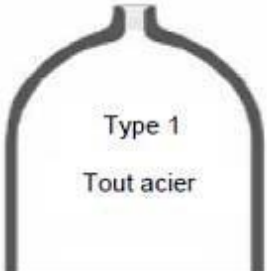
Il existe aujourd'hui trois manières principales de stocker l'hydrogène. L'objectif est d'obtenir une bonne compacité. Dans les conditions normales de température et de pression (CSTP) 1 bar, 20 °C, l'hydrogène occupe un volume de 333 L pour une énergie disponible de 1 kWh calculée au pouvoir calorifique inférieur (PCI) de l'hydrogène. Dans les mêmes conditions, l'essence occupe 0,1 L/kWh. On comprend aisément la nécessité de gagner en compacité. Le premier moyen d'y parvenir est de

comprimer le gaz. À 700 bar par exemple, l'hydrogène occupe un volume de 0,47 L/kWh(H₂). Une autre manière de gagner en compacité est de le liquéfier, ce qui exige de le refroidir en dessous de 20,3 K. À ce moment, l'hydrogène occupe un volume de 0,38 L/kWh(H₂). Enfin, le troisième mode de stockage dit « stockage solide » consiste à se servir d'un matériau qui absorbera l'hydrogène. Les atomes d'hydrogène qui pénètrent la maille cristalline d'un matériau s'hydrurant se trouvent plus proches que sous sa forme gazeuse, ou même liquide. Par exemple, pour certains matériaux absorbant l'hydrogène, le volume occupé peut se réduire à 0,25 L/kWh(H₂) dans les conditions normales de température et de pression. On comprend tout l'intérêt de ce mode de stockage qui bénéficie d'une très bonne capacité volumique, avec cependant des capacités massiques faibles, puisque la masse du matériau stockant l'hydrogène est nettement plus forte que celle de la masse d'hydrogène stockée [24].

A. Stockage d'hydrogène gazeux

Des réservoirs classiques pouvant supportés de hautes pressions ont été testés sous des pressions allant jusqu' à 300 bars et ont été régulièrement remplis sous des pressions de 200 bars et ceci dans plusieurs pays. Stocker 4 kg d'hydrogène nécessite un volume de 225 litres ou 5 réservoirs de 45 litres chacun. De nouveaux réservoirs hautes pressions en matériaux composites renforcés par fibres de carbone ont été développés ; ils sont testés sous 600 bars et remplis régulièrement sous 450 bar pour un usage régulier. Cependant ils ont besoin d'un revêtement intérieur inerte pour éviter que l'hydrogène sous haute pression ne réagisse avec le polymère. Ainsi une autre solution est d'utiliser un réservoir en aluminium inerte vis-à-vis de l'hydrogène et de le renforcer extérieurement avec un revêtement en fibres de carbone. Des réservoirs sphériques de diamètre d'un peu moins de 60 cm sont capables de contenir 4 kg mais d'un point de vue pratique une forme cylindrique est préférable. Ces réservoirs haute pression, peuvent contenir lorsqu'ils sont pleins 4 % en masse d'hydrogène mais présentent des inconvénients majeurs : le carburant hydrogène doit être accessible pour des pressions allant de 450 bars à zéro de surpression, ce qui rend nécessaire la mise en place d'un dispositif annexe de contrôle de pression. Les réservoirs hauts pression présentent un risque considérable, la compression est la plus dangereuse et la plus compliquée des solutions. Au Japon, les véhicules transportant ces réservoirs, sont interdits sur les routes [25]. Le stockage d'hydrogène par compression est la méthode la plus simple et la plus mature parmi les technologies disponibles, Il existe 4 types de réservoirs [23].

Tabel 4:les technologies de réservoirs[23]

 Type 1 Tout acier	 Réservoir tout	Type I : Ils sont entièrement métalliques, le métal assurant la structuration et l'étanchéité du réservoir. Les pressions maximales ne dépassent généralement pas 250 bar pour des applications mobiles et peut atteindre des pressions supérieures sur des stockages stationnaires.
 Type 2 Acier avec renfort composite circonférentiel	 Liner métallique Bobinage composite « hoop Wrap »	Type II : Ce type de réservoir est fabriqué en métal entouré par un cylindre de filament autour de la virole de l'enveloppe métallique. Les réservoirs construits en métal-fibre permettent un stockage d'hydrogène jusqu'à une pression de 850 bar.
 Type 3 Liner acier avec renfort composite complet	 Liner métallique Bobinage « fully Wrap »	Type III : Le réservoir de type III est composé de matériaux composites entourant un liner (enveloppe interne) en métal. Les composites sont généralement basés sur des fibres d'aramide ou de verre. Des pressions de l'ordre de 350 bar sont couramment atteintes. Des réservoirs de type III à 700 bar existent en fibre de carbone. Ceux-ci présentent cependant encore parfois une tenue au cyclage de pression insuffisante, ce qui peut être un obstacle à leur homologation pour utilisation dans les véhicules³⁵.
 Type 4 Liner composite avec renfort composite	 Liner plastique Bobinage « fully Wrap »	Type IV : Le réservoir de type IV est fabriqué sur un bobinage tournant avec des matériaux composites comme la fibre de carbone sur un liner aussi en polymère (polyéthylène, polyamide). Le liner est en général produit par injection-soufflage ou par roto-moulage. Ce type de réservoir peut stocker l'hydrogène jusqu'à une pression de 1000 bar.

B. Stockage d'hydrogène sous forme liquide

L'hydrogène se liquéfie en dessous de 20 K à pression atmosphérique. Dans ces conditions, le liquide est 800 fois plus dense que le gaz à température ambiante et selon le type de réservoir cryogénique utilisé une capacité massique de l'ordre de 6.5 % est obtenue pour le système complet. Les procédés

de liquéfaction du gaz font appel à des techniques assez complexes qui associent apport de froid et détente adiabatique. Les procédés de liquéfaction du gaz font appel à des techniques assez complexes qui associent apport de froid et détente adiabatique. La première liquéfaction de l'hydrogène a été obtenue par Claude en utilisant un cycle se répartissant en plusieurs étapes. Le gaz est tout d'abord refroidi depuis l'ambiante jusqu'à 230 K par un groupe frigorifique mécanique puis jusqu'à 80 K en utilisant un échangeur à azote liquide. L'hydrogène subit alors des cycles de compressions détentes qui permettent encore d'abaisser sa température avant d'être soumis à une détente de Joule-Thompson qui conduit à la liquéfaction [26].

C. Stockage d'hydrogène sous forme solide

Outre les modalités de stockage sous forme gazeuse ou liquide, l'hydrogène peut être conservé, selon la voie dite « du stockage chimique », dans des matériaux solides. On obtient la formation de composés définis, ou hydrures, où l'atome d'hydrogène, issu de la dissociation de la molécule H_2 forme une liaison métallique ou « iono-covalente » avec les éléments d'une structure existante, le plus souvent formée de façon majoritaire d'atomes métalliques. Le phénomène est réversible la plupart du temps, l'atome H occupant alors des sites interstitiels, laissant le réseau métallique assez peu perturbé. À la désorption*, les atomes hydrogène quittent la liaison chimique pour reformer des molécules de gaz H_2 (figure 1). Le matériau métallique agit donc comme une éponge qui absorbe et désorbe l'hydrogène suivant des cycles (température, pression) maîtrisés [1].

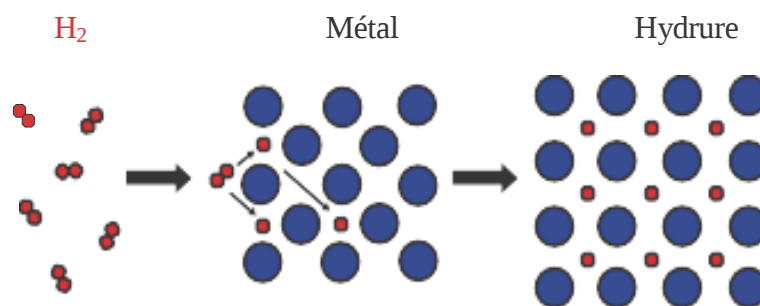


Figure 8: Dissociation de l'hydrogène en surface, diffusion dans le métal et formation de l'hydruire métallique [1].

Le stockage d'hydrogène dans les solides est une méthode en plein développement. Elle permet de stocker une grande quantité d'hydrogène dans un volume optimal à une température et une pression

raisonnables. On distingue trois grandes voies de stockage dans les solides correspondant à la mise en œuvre de trois types de phénomènes physico-chimiques différents : l'absorption, l'adsorption et la réaction chimique. Les conditions de stockage de l'hydrogène en pression et la température varient en fonction du phénomène de stockage et du type de solide utilisé. Le choix d'un adsorbant/absorbant plus adapté au stockage d'hydrogène est donc étroitement lié aux propriétés physico-chimiques et aux conditions opératoires envisagées pour effectuer le stockage [23].

II.4 Les risques encourus

Les risques peuvent être mineurs ou majeurs, cela dépend de la quantité d'hydrogène, son utilisation, la pression à laquelle il est soumis ainsi que la gravité de la fuite. Cette liste répertorie les principaux risques dans l'ordre croissant [27]:

- ✚ **Le risque acoustique:** Une petite fuite peut endommager l'acuité auditive. A une telle pression, une petite fuite peut être plus bruyante qu'un avion au décollage, soit plus de 125dB.
- ✚ **L'asphyxie:** En cas de fuite dans un espace confiné, la concentration d'hydrogène peut causer des troubles de la respiration allant jusqu'à l'asphyxie.

L'hydrogène est un gaz qui, en contact avec l'oxygène, est très facilement inflammable. Cela représente les risques les plus importants à prendre en compte, à savoir :

- ✚ **Le risque d'inflammation faible:** En cas de fuite à faible débit, l'hydrogène se mélange à l'oxygène de l'air et, si nous nous trouvons à proximité d'un feu ou d'une étincelle, des flammes feront leurs apparitions.
- ✚ **Le jet enflammé:** Un jet enflammé apparaît lorsque le débit de la fuite est très important. Les températures atteintes par une telle flamme sont de l'ordre de 2100°C.
- ✚ **La déflagration:** Lorsque le débit est élevé ou lorsque la fuite a lieu dans un espace confiné, une déflagration peut avoir lieu. Le front de flamme de la déflagration se déplace à une vitesse subsonique.
- ✚ **La détonation:** Elle a lieu lorsqu'il y a une libération soudaine du gaz à très haute pression. La vitesse du front de flamme est supersonique (1980m/s pour l'hydrogène) et s'ensuit d'une violente onde de choc. Les dommages peuvent être considérables dans le cas d'une détonation.

Voici Les causes et moyens de prévention issus de l'étude ADEME(**Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie**) concernant la prévention des fuites d'hydrogène dans le Tableau 5

,Ainsi que la prévention de mélange H₂/O₂ dans le Tableau 6[23].

Tabel 5 : Causes et mesures de conception pour éviter les fuites d'hydrogène

Causes de fuite d'hydrogène	Localisation des causes	Moyens de prévention
Perméation (débit minime) Taille des molécules d'hydrogène	Tout équipement contenant de l'hydrogène	Pour les réservoirs : revêtements polymères anti-perméation (ex : revêtements des réservoirs de type IV)
Usure (moyen débit) Corrosion Fatigue mécanique	Tout équipement contenant de l'hydrogène	- Choix des matériaux adaptés pour l'hydrogène (ex : ISO TR 15916) et pour l'hydroxyde - Prévention des vibrations et des cycles de contraintes
Défaut d'étanchéité (moyendébit) Raccords vissés Vibrations mécaniques surraccords vissés	Tout équipement contenant de l'hydrogène	Privilégier les raccords soudés aux raccords vissés lorsque c'est faisable
Rupture (grand débit) Surpressions Agression mécanique externe	Tout équipement contenant de l'hydrogène	Application des normes et directives liées aux équipements sous pression

Tabel 6: Causes et mesures de conception pour éviter le mélange H₂/O₂

Causes de mélange H ₂ -O ₂	Localisation des causes	Moyens de prévention
Rupture d'une membrane par Surchauffe ; Encrassement des membranes Défaut de refroidissement de l'eau Déséquilibre de pression Défaut de régulation de pression Bouchage d'un événement	Cellules d'électrolyse (alcaline et PEM)	- Contrôle de la qualité et du niveau d'eau alimentant l'électrolyseur - Mesure de la température des empilements - Mesure de la pression différentielle entre les compartiments H₂ et O₂ - Procédé DEOXO qui recombine l'oxygène en présence d'un catalyseur
Transfert d'H ₂ dans le compartiment O ₂ en aval des cellules d'électrolyse Défaillance de la boucle de pilotage Communication des deux compartiments Fuite dans un échangeur thermique commun	Compartiments H ₂ et O ₂ de l'électrolyseur (en aval des cellules d'électrolyse)	Isoler et cloisonner autant que possible les compartiments H₂ et O₂

II.5 Le transport et la distribution

Une fois produit, l'hydrogène peut être transporté auprès de ses utilisateurs via trois principaux moyens de distribution:

- transport gazeux par pipelines ;
- transport routier gazeux à 200 bar par remorques ou trailers ;
- transport routier ou par rail d'hydrogène liquide cryogénique à - 253 °C.

L'hydrogène peut, tout comme le gaz naturel, être distribué dans un gazoduc. Mais seule l'utilisation du réseau de gaz naturel existant est envisagée à grande échelle (application power-to-gas) car le coût de construction d'un réseau dédié serait prohibitif. Mentionnons néanmoins qu'en Europe, plus de 1 500 km de réseau dédié sont en exploitation dans deux principaux réseaux au Benelux et en Allemagne (dont 240 km sont en exploitation depuis 1938). Aux États-Unis, ce sont environ 1 150 km de pipelines en service sur plusieurs réseaux différents [28]. voir la figure [29].



Figure 9: les différentes voies de synthèse de l'hydrogène [29]

II.6 Conclusion

Le monde de l'hydrogène, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau, industriel, connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant de l'énergie vu que c' est réellement intéressant pour le stockage des énergies renouvelables et son utilisation dans des installations non raccordées au réseau électrique, voire portable ou mobile. Ce chapitre ca était le base théorique pour la suite de notre mémoire Il nous a permis de décrire et analyser les différentes technologies de production, d'utilisation, de distribution et de stockage de l'hydrogène. Dans le troisième chapitre nous aborderons les modèles physiques utilisés pour modéliser notre système.

CHAPITRE

III Modélisation de système production d'hydrogène

III. Chapitre III : Modélisation de système production d'hydrogène

III.1 Introduction

Le modèle mathématique consiste à définir une modélisation qui permet de décrire le comportement théorique d'un système quelconque et ses performances dépendent de son aptitude à le faire d'une manière la plus réaliste et la plus précise possible. Dans ce qui suit nous présentons les modèles mathématiques des générateurs à énergie renouvelables retenus (solaire) en décrivant chacun des éléments du système. À noter que le système qui nous intéresse regroupe quatre sous-systèmes principaux à savoir le générateur photovoltaïque (PV), L'électrolyseur (EL), une pile à combustible(ou FC pour Fuel Cell) et le système de stockage pour emmagasiner l'hydrogène produite afin d'utiliser lors des périodes de manque d'apport.

III.2 Modélisation du système photovoltaïque [30]:

A. Modélisation du gisement solaire

✓ Irradiations globales sur un plan incliné

L'irradiation globale sur un plan incliné peut être calculée par la relation suivante :

$$G_{inc} = B_{in} + D_i + R_i \quad \text{Équation 1}$$

Avec :

B_{in} : irradiation directe sur un plan incliné ;

D_i : irradiation diffuse sur un plan incliné ;

R_i : irradiation réfléchis sur un plan incliné

✓ Irradiations directes sur un plan incliné

$$B_{in} = R_b \cdot (G_H - D_H) \quad \text{Équation 2}$$

Avec :

G_H : valeurs horaires des irradiations globale ;

D_H : valeurs horaires des irradiations Diffuse ;

R_b : le facteur de forme.

✓ Le facteur de forme peut être aussi donné par la relation

$$R_b = \frac{\cos(\theta_i)}{\sin(h)} \quad \text{Équation 3}$$

θ_i : l'angle d'incidence ;

h : hauteur du soleil.

✓ Irradiations diffuses sur un plan incliné

L'irradiation diffuse sur un plan incliné est donnée par l'équation suivante :

$$D_i = D_H \cdot \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \quad \text{Équation 4}$$

Avec

β : Angle d'inclinaison de la surface de captation ;

D_H : irradiation diffuse sur un plan horizontal.

✓ Irradiations réfléchies sur un plan incliné

L'irradiation réfléchie par le sol et incident sur un plan incliné est donnée par l'équation suivante :

$$R_i = (B_n \sin h + D_H) \cdot \rho \cdot \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad \text{Équation 5}$$

Avec

ρ : Albédo du sol ;

B_n : irradiation directe sur un plan normal.

B. Modélisation d'une cellule et du module PV

✓ Modélisation d'une cellule PV

HOMER utilise l'équation suivante pour calculer la puissance de sortie de la matrice PV :

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_P (T_C - T_{C,STC})] \quad \text{Équation 6}$$

Où :

Y_{PV} : Capacité nominale du générateur PV [kW],

f_{PV} : Facteur de déclassement PV [%],

$\bar{G}_T$: Rayonnement solaire incident sur le générateur PV [kW/m²],

$\bar{G}_{T,STC}$: Rayonnement incident aux conditions d'essai standard [1kW/m²],

α_P : Coefficient de température de la puissance [%/°C],

T_C : Température de la cellule PV [°C],

$T_{C,STC}$: Température de la cellule PV dans des conditions d'essai standard [25°C],

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui

consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement. Si dans la fenêtre d'entrée PV on choisit de ne pas modéliser l'effet de la température sur le générateur PV, HOMER suppose que le coefficient de température de la puissance est nul, de sorte que l'équation ci-dessus se simplifie et devient :

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{G_T}{G_{TSTC}} \right) \quad \text{Équation 7}$$

Le schéma suivant est l'équivalent d'une cellule photovoltaïque composée d'un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN, mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistif parasite dû à la fabrication

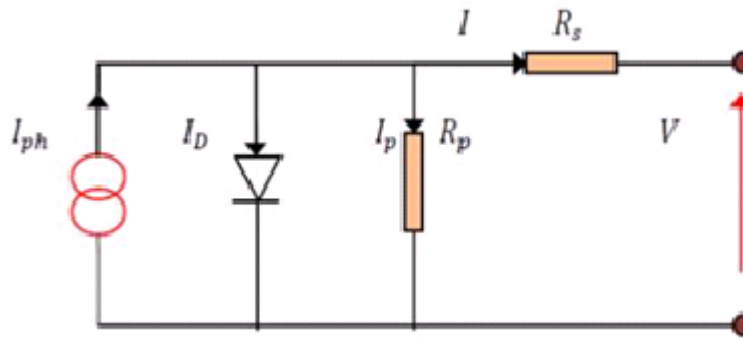


Figure 10 :Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

Dans la Fig.2 la source de courant génère un courant I_{ph} proportionnel à l'éclairement H [W/m^2]. La résistance shunt R_p caractérise le courant de fuite au niveau de la jonction et la résistance R_s représente les diverses résistances de contact et de connexion. Le courant I fourni par la cellule est la différence entre le courant I_{ph} et le courant de la diode I_D

$$I = I_{ph} - I_D - I_p. \quad \text{Équation 8}$$

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left(\exp \frac{e(V+R_s I)}{mkT_c} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad \text{Équation 9}$$

Où :

I_0 : le courant de saturation de la jonction non éclairée ;

I_c : le courant de la cellule ;
 e : la charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C);
 K : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K);
 T_c : température de jonction de la cellule photovoltaïque ;
 m : facteur d'idéalité de la jonction ;
 V : la tension aux bornes de la cellule ;
 R_s : résistance série ;
 R_p : résistance shunt.

$$I_0 \left(\exp \frac{e(V+R_s I)}{m k T_c} - 1 \right) \quad \text{Équation 10}$$

$$I_p = \exp \left(\frac{-E_g}{k T_c} \right) \quad \text{Équation 11}$$

$$V_T = \frac{k T_c}{e} \quad \text{Équation 12}$$

La tension thermique :

Ou :

E_g est l'énergie de la bande interdite pour un matériau semi-conducteur donné, E_g est presque constante et I_0 est donc une fonction de la température. Idéalement, on peut négliger R_s et I devant V , puis travailler avec un modèle simplifié :

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{e \cdot V}{m \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right) - \frac{V}{R_p} \quad \text{Équation 13}$$

✓ Modélisation du Module PV BP SX150

Pour réaliser cette modélisation, nous avons choisi le modèle photovoltaïque BP SX 150 de chez BP Solaire. La série SX de BP Solaire [31] fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe de charges courant continu, ou de charges courant alternatif sur les systèmes munis d'onduleur. Le module est composé de 72 cellules solaires multi cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 150 W.

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau ci-après [32]:

Table 7: Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque

Puissance maximale (P _{max})	150 W
Tension à P _{max} (V _{mp})	34,5 V
Courant à P _{max} (I _{mp})	4,35 A
Courant à court-circuit (I _{sc})	4,75 A
Tension à circuit ouvert (V _{oc})	43,5 V
Coefficient de température d'I _{sc}	0,065 ± 0,015 %/°C
Coefficient de température de V _{oc}	-160 ± 20 mV%/°C
Coefficient de température de la puissance	-0,5 ± 0,05 %/°C
NOCT	47 ± 2 °C

Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés pour simuler le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque. Ces modèles se différencient par la méthode de calcul et le nombre des paramètres intervenants dans la caractéristique courant - tension. Dans ce cas, le modèle qu'on a choisi est simple nécessitant que les paramètres donnés par le fabricant, la caractéristique I-V de ce modèle est illustrée ci-dessous:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{m V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad \text{Équation 14}$$

Ou :

ID le courant de diode est donné par l'équation :

$$I_D = I_0 \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{m V_T} \right) - 1 \right) \quad \text{Équation 15}$$

Le courant de saturation inverse d'une diode est donné par :

$$I_0 = I_{sc} / \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{m V_T} \right) - 1 \right) \quad \text{Équation 16}$$

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ($R_p = \infty$) l'Équation 14) devienne :

$$I = I_{sc} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{m V_T} \right) - 1 \right) \quad \text{Équation 17}$$

Avec :

I : Le courant fourni par la cellule.

V : La tension aux bornes de la cellule.

Avec :

I : Le courant fourni par la cellule.

V : La tension aux bornes de la cellule.

$$I = I_{sc} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V+I \cdot R_s}{mV_T} \right) - 1 \right) \quad \text{Équation 18}$$

Calcule de la résistance série dans le point Voc :

$$dI = 0 - I_0 \cdot \left(\frac{dV+dI \cdot R_s}{mV_T} \right) \cdot \left(\exp \left(\frac{V+I \cdot R_s}{mV_T} \right) \right) \quad \text{Équation 19}$$

La résistance série influe largement sur la pente de la courbe des caractéristique I-V au Voisinage de Voc. Elle peut être calculée par la formule suivante :

$$R_s = - \frac{dV}{dI} - \frac{mV_T}{I_0 \left(\exp \left(\frac{V+I R_s}{mV_T} \right) \right)} \quad \text{Équation 20}$$

$$R_s = - \frac{dV}{dI} - \frac{mV_T}{I_0 \left(\exp \left(\frac{V_{oc}+I R_s}{mV_T} \right) \right)} \quad \text{Équation 21}$$

Enfin, pour résoudre l'équation de caractéristique non linéaire, on utilise la méthode de Newton décrite par :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad \text{Équation 22}$$

Où :

$f'(x_n)$: La dérivée de la fonction $f(x_n)$

x_n : La présente itération

x_{n+1} : L'itération suivante

Ainsi, on récrit l'Équation 23 sous la forme suivante :

$$f(I) = I_{sc} - I - I_0 \left(\exp \left(\frac{V+I \cdot R_s}{mV_T} \right) - 1 \right) = 0 \quad \text{Équation 24}$$

En remplaçant dans l'équation 23, on calcule le courant I par les itérations :

$$x_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I_n - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + I_n \cdot R_s}{mV_T}\right) - 1 \right)}{-1 - I_0 - \left(\frac{R_s}{mV_T}\right) \left(\exp\left(\frac{V + I_n \cdot R_s}{mV_T}\right) \right)} \quad \text{Équation 25}$$

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser notre calcul pour différentes éclairagements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements.

$$I_{sc} = I_{scr}(T_{ref}) \cdot [1 + a(T - T_{ref})] \quad \text{Équation 26}$$

$$I_{sc} = I_{scr} \left(\frac{G}{1000} \right) \quad \text{Équation 27}$$

Où :

I_{scr} le cour ant de court-circuit de référence.

$$I_0(T) = I_0(T_{ref}) \cdot \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^{\frac{3}{m}} \cdot \left[\exp\left(\frac{-e_E g}{mk}\right) \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad \text{Équation 28}$$

Où :

a : Le coefficient de variation du courant en fonction de la température.

T_{ref} : La température de référence, 298k (25°C).

G : L'irradiation solaire globale.

III.3 La modélisation de la pile à combustible [33]:

Il existe plusieurs types de pile à combustible et elles sont classées généralement selon l'application, la puissance, le type du carburant, le type de charge transfère par l'électrolyte, la température de fonctionnement et l'électrolyte utilise. La modélisation des piles à combustible prend une part très importante dans leur développement, car elle facilite la compréhension des phénomènes mis en jeu en leur sein. Il existe ainsi un grand nombre de modèles de piles à combustible, qui ont généralement chacun leurs propres spécificités et utilités, suivant les phénomènes étudiés.

La figure suivante, représente un modèle physique d'une pile à combustible (PAC).

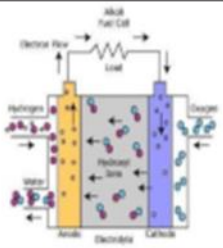
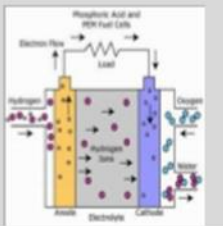
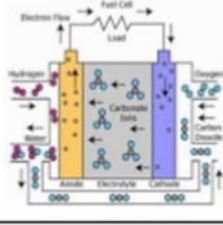
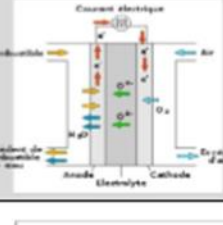
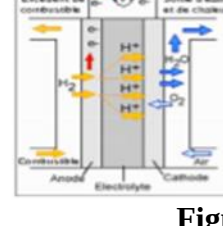
Type s des piles à combustible	Principes de fonctionnement	Matériau électrolytique	Température [C]°	Carburant	Rendement	Réaction s chimiques	Applicati ons possibles
Piles à combustible alcalines (AFC)		Solut ion d'hydroxyde de potassium (KOH) et L'eau	50 à 250°C	L'h ydrogène	55 - 60%	A.R: $H_2 + 4 OH^- \Rightarrow 4 H_2O + 4 e^-$ C.R: $O_2 + 2 H_2O + 4 e^- \Rightarrow 4 OH^-$	Spatial, Défense, Equipements, portables
Piles à combustible à acide phosphorique (PAFC)		Solut ion d'acide phosphorique dans un moule en carbure de silicium	150 à 220°C	L'h ydrogène	35 - 45% 5% en C ogénération	A.R: $2 H_2 \Rightarrow 4 H^+ + 4 e^-$ C.R: $O_2 (gaz) + 4 H^+ + 4 e^- \Rightarrow 2 H_2O$	Stationnaire, cogénération, Transport
Piles à combustible à carbonate fondu (MCFC)		Sel décarbonate fondu liquide	600 à 800°C	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...	50-60%	An: $2 H_2 \Rightarrow 4 H^+ + 4 e^-$ CR: $O_2 (gaz) + 4 H^+ + 4 e^- \Rightarrow 2 H_2O$	Stationnaire, cogénération
Pile à combustible à oxyde solide (SOFC)		Céramique solide	700 à 1050°C	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...	50 - 55% 70% en ogénération	A.R: $2 H_2 + 2 O^{2-} \Rightarrow 2 H_2O + 4 e^-$ C.R: $O_2 + 4 e^- \Rightarrow 2 O^{2-}$	Stationnaire, cogénération
Piles à Combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC)		Membrane en polymère solide	70 à 100°C	Hydrogène	30 - 45%	A.R: $2 H_2 \Rightarrow 4 H^+ + 4 e^-$ C.R: $O_2 + 4 H^+ + 4 e^- \Rightarrow 2 H_2O$	Spatial, Transport, Stationnaire, Equipement portable

Figure 11: Modèle physique de la pile à combustible

La PAC correspond à une source d'énergie, en fonction du besoin de la charge un point de fonctionnement (Tension / Courant) va s'établir. La quantité d'hydrogène consommée est proportionnelle à la quantité d'électricité absorbée par la charge.

Les débits d'entrée de l'hydrogène (H₂), de l'oxygène (O₂) et l'eau (H₂O) sont donnés par l'équation suivante :

$$m_{j,in} = \frac{N_0 \cdot I}{2 \cdot F \cdot U} \quad \text{Équation 29}$$

I: Courant électrique (A).

j: Représente l'élément (H₂O, H₂, O₂).

U : taux d'utilisation.

F : constante de faraday.

N₀ : nombre de cellules en série.

La résistance interne :

Elle est donnée comme suit,

$$R_{int} = 0.01605 - 3.5 \cdot 10^{-5} \cdot T + 8 \cdot 10^{-5} \cdot I \quad \text{Équation 30}$$

Les pertes ohmiques

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance qui oppose les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. Elles sont données par l'équation suivante :

$$\eta_{ohmic} = I \cdot R_{int} \quad \text{Équation 31}$$

La surtension d'Activation

Les pertes d'activation sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes.

$$\eta_{act} = B \cdot \log(C \cdot I) \quad \text{Équation 32}$$

B : constante d'activation de tension (A⁻¹)

C : facteur d'échelle. m/s

I: Courant électrique (A).

Résistance d'activation Ra

$$R_a = -\frac{\eta_{act}}{I} \quad \text{Équation 33}$$

✚ La constante de modélisation Kr

C'est une constante supposée utilisée durant les calculs pour simplifier l'écriture des équations, elle est donnée par :

$$K_r = \frac{N_o}{4.F} \quad \text{Équation 34}$$

✚ La pression de l'hydrogène

La quantité d'hydrogène et de l'oxygène consommée dans la pile à combustible dépend des débits d'entrée et de sortie, de courant, et volume des électrodes, si les débits d'entrée et de sortie sont connus, la pression à l'anode peut être déterminée par la loi des gaz parfait :

$$PV = nRT \quad \text{Equation 35}$$

$$\frac{V_a}{RT} \frac{dP_{H2}}{dt} = \dot{m}_{H2 \text{ in}} - \dot{m}_{H2 \text{ out}} - 2 \cdot K_r \cdot I \quad \text{Equation 36}$$

$$\frac{dP_{H2}}{dt} = \frac{RT}{V_{an}} (\dot{m}_{H2 \text{ in}} - \dot{m}_{H2 \text{ out}} - 2 \cdot K_r \cdot I) \quad \text{Equation 37}$$

$$\dot{m}_{H2 \text{ out}} = K_{H2} \cdot P_{H2} \quad \text{Équation 38}$$

On remplace $\dot{m}_{H2 \text{ out}}$ pour obtenir :

$$\frac{dP_{H2}}{dt} = \frac{RT}{V_{an}} (\dot{m}_{H2 \text{ in}} - 2 \cdot K_r \cdot I) - \frac{RT}{V_{an}} K_{H2} \cdot P_{H2} \quad \text{Équation 39}$$

$$P_{H2} = \frac{1}{K_{H2}} (\dot{m}_{H2 \text{ in}} - 2 \cdot K_r \cdot I) - \frac{dP_{H2}}{dt} \cdot \frac{V_{an}}{RTK_{H2}} \quad \text{Équation 40}$$

$$\tau_{H2} = \frac{V_{an}}{RTK_{H2}} \quad \text{Équation 41}$$

Après simplifications, on aura :

$$\tau_{H2} \frac{dP_{H2}}{dt} + P_{H2} = \frac{1}{K_{H2}} (\dot{m}_{H2 \text{ in}} - 2 \cdot K_r \cdot I) \quad \text{Équation 42}$$

En appliquant la transformation de LAPLACE on aura :

$$P_{H2} = \frac{\frac{1}{K_{H2}}}{\tau_{H2} \cdot s + 1} (\dot{m}_{H2 \text{ in}} - 2 \cdot K_r \cdot I) \quad \text{Équation 43}$$

✚ Pression d'oxygène PO2 :

On procède de la même manière que précédemment pour calculer la pression de l'oxygène, cette pression est donnée par :

$$\frac{dP_{O_2}}{dt} = \frac{RT}{V_c} (\dot{m}_{O_2 \text{ in}} - \dot{m}_{O_2 \text{ out}} - Kr \cdot I) \quad \text{Equation 44}$$

Ce qui donne :

$$P_{O_2} = \frac{\frac{1}{K_{O_2}}}{\tau_{O_2 \cdot S+1}} (\dot{m}_{O_2 \text{ in}} - Kr \cdot I) \quad \text{Équation 45}$$

Pression de l'eau :

Le calcul de la pression de l'eau se fait de la même manière que l'oxygène et l'hydrogène, la pression de l'eau est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{V_a}{RT} \frac{dP_{H_2O}}{dt} = \dot{m}_{H_2O \text{ in}} - \dot{m}_{H_2O \text{ out}} + 2 \cdot Kr \cdot I \quad \text{Equation 46}$$

Après développement et simplification, on trouve :

$$P_{H_2O} = \frac{\frac{1}{K_{H_2O}}}{\tau_{H_2O \cdot S+1}} (2 \cdot Kr \cdot I) \quad \text{Équation 47}$$

I : courant électrique (A).

Kr : la constante de modélisation.

L. Potentiel thermodynamique :

La tension réversible dépend en pratique des pressions et de la température de fonctionnement. Il s'agit de la loi de Nernst :

$$E = \left[E_0 + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} * \log \left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) \right] \quad \text{Équation 48}$$

E_0 : est la tension (le « potentiel ») standard, calculé à partir de l'enthalpie libre standard définie pour 25°C et à 1 bar et sont respectivement les pressions relatives (bars) des gaz oxygène et hydrogène

F : est la constante de Faraday (96485 C/mol).

R : constante des gaz parfaits. (8,314J/K/mol).

P : Pression en atmosphérique.

T : température de fonctionnement du composant (K)

Tension d'une cellule de la PAC :

La tension de sortie de la cellule est déterminée par la combinaison de l'effet thermodynamique, transport de masse, la cinétique et la résistance ohmique, elle est donnée comme suit :

$$V = E - \eta_{act} - \eta_{ohmic} \quad \text{Équation 49}$$

V : Tension d'une cellule, Volt

η_{act} : Polarisation d'activation de l'anode et de la cathode, Volt

η_{ohm} : Polarisation ohmique de l'anode et de la cathode, Volt

Tension totale de la cellule PAC :

La pile à combustible est composée de plusieurs cellules placées en série formant un assemblage

$$V_{stack} = N_0 * V_{cell} \quad \text{Équation 50}$$

N_0 : nombre de cellules en série dans l'assemblage

V_{Cell} : Tension d'une cellule.

Puissance d'une pile à combustible :

La puissance de la pile à combustible est le produit de la tension et le courant de cette dernière, elle est donnée par l'équation suivante :

$$P = V_{stack} \cdot I \quad \text{Équation 51}$$

V_{stack} : Tension de l'assemblage,

I : Courant de pile(A).

III.4 Electrolyseur d'eau [34]

Un électrolyseur d'eau alcalin réelle se compose de plusieurs cellules connectées en série. Le modèle présenté est basé sur les caractéristiques d'une seule cellule. Le calcul de la tension de fonctionnement requis, les taux de production de masse de flux de l'hydrogène et l'oxygène, et la génération de chaleur interne sont tous fait sur une base d'une cellule, tandis que la valeur correspondante d'une unité d'électrolyseur, tout simplement en multipliant par le nombre de cellules en série. Le calcul de la température de fonctionnement est basé sur un ensemble de coefficient de transfert thermique et une capacité thermique localisée pour un électrolyseur.

Relation entre le changement de l'énergie de Gibbs et le potentiel de la cellule

électrique W_e nécessaire pour séparer l'eau est égal à la variation de l'énergie de Gibbs ΔG . C'est :

$$W_e = \Delta G \quad \text{Équation 52}$$

Tel que, L'énergie électromotrice électrique E est liée avec le travail électrique

$W_e = q E$, avec q est la charge électrique, qui circule dans le circuit de la cellule. Selon la loi de Faraday, nous avons:

$$W_e = \Delta G = qE = nFE \quad \text{Équation 53}$$

Où n nombre de mole d'é transférés par mole d'eau ($n=2$), E fem appliqué V , F constante de faraday. $F=96.485 \text{ C mol}^{-1}$, La fem d'un processus électrochimique réversible est appelé la tension réversible.

la tension réversible U_{rev} d'une cellule peut être exprimée par :

$$U_{rev} = \frac{\Delta G}{nF} \quad \text{Équation 54}$$

De manière analogue, la demande totale d'énergie H est liée à la tension thermoneutre par l'expression suivante :

L'analyse thermodynamique nous permet de démontrer que, pour une réaction réversible le travail

$$U_{tm} = \frac{\Delta H}{nF} \quad \text{Équation 55}$$

Par conséquent, U_{rev} et U_{tm} est tout simplement la notation pour les valeurs de l'énergie G et H , respectivement. En condition standard $U_{rev}=1.229 \text{ V}$ et $U_{tm}=1.482 \text{ V}$, mais ces changements avec la température et de pression, de manière analogue avec G et H .

Caractéristiques Tension-Courant d'un électrolyseur

La cinétique d'électrode d'une cellule d'électrolyse peut être modélisée à l'aide d'un empirique modèle. Les modèles empiriques $U-I$ pour l'électrolyseur ont été suggérés par Griesshaber et Sick (1991), Hug et al. (1992), Havre et al. (1995), et Vanhanen (1996). La caractéristique utilisée dans notre travail est basée sur le modèle de Griesshaber [35].

$$U = U_{rev} + \frac{r}{A} I + \sum \log \left(\frac{t}{A} I + 1 \right) \quad \text{Équation 56}$$

Avec

r paramètres de la résistance ohmic de l'électrolyte ($i = 1 \dots 2$)

s, t paramètres de surtension en électrodes ($i = 1 \dots 3$)

A surface de l'électrode, m²

Afin de modéliser correctement la dépendance de la température de la surtension, Ulleberg (1997), proposée un modèle plus performant, qui prend en compte la température, la résistance ohmique, les coefficients de surtension [35].

$$U = U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 T}{A} I + (s_1 + s_2 T + s_3 T^2) \log \left(\frac{t_1 + t_2/T + t_3/T^2}{A} I + 1 \right) \quad \text{Équation 57}$$

Avec r_i paramètres de la résistance ohmic de l'électrolyte ($i = 1 \dots 2$) si, t_i paramètres de surtension en électrodes ($i = 1 \dots 3$) A surface de l'électrode, m² T température de l'électrolyte, °C.

Modèles thermiques d'électrolyseur

La température de l'électrolyte de l'électrolyseur à une influence direct sur les performances de l'électrolyseur. L'énergie thermique générée interne est due aux lacunes dans les cellules, une partie est stockée dans les masses entourant et une partie est transférée à la température ambiante, soit par des processus naturels ou par refroidissement auxiliaire. Ainsi, de la théorie de base de transfert de chaleur (Incropera and DeWitt, 1990), Ulleberg propose trois options pour calculer la température T pour un simple modèle thermique [35]. Nous proposons ici l'un des modèles :

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{Q}_{store} + \dot{Q}_{loss} + \dot{Q}_{cool} \quad \text{Equation 58}$$

$$\dot{Q}_{gen} = n_c (U - U_m) I = n_c U I (1 - \eta_c) \quad \text{Équation 59}$$

$$\dot{Q}_{store} = C_t \frac{dT}{dt} \quad \text{Équation 60}$$

$$\dot{Q}_{loss} = \frac{1}{R_t} (T - T_a) \quad \text{Équation 61}$$

$$\dot{Q}_{cool} = C_{cw} (T_{cw,i} - T_{cw,o}) \quad \text{Équation 62}$$

Où

n_c nombre de cellule en série

U tension V

U_{tn} tension thermoneutre V

I courant A

η_c rendement énergétique

C_t capacité thermique de l'électrolyte, JK⁻¹

T température de l'électrolyte °C

R_t résistance thermique KW-1

T_a température ambiante °C

C_{cw} capacité thermique de l'eau de refroidissement JK-1

$T_{cw,i}, T_{cw,o}$ température de l'eau de refroidissement (in et out), °C

$$T_{cw,o} = T_{cm,i} + (T - T_{cw,i}) \left[1 - \exp\left(\frac{-k_{HX}}{C_{cw}}\right) \right] \quad \text{Équation 63}$$

Avec k_{HX} coefficient d'échange effectif thermique pour le processus de refroidissement. Est obtenu par une équation empirique suivante :

$$k_{HX} = h_{cond} + h_{conv} \cdot I \quad \text{Équation 64}$$

Où

h_{cond} : coefficient de conduction thermique (W/°C)

h_{conv} : coefficeint de convection thermique [W/(°C.A)]

Production d'hydrogène (effet de faraday)

Selon la loi de faraday, le taux de production d'hydrogène dans une cellule d'électrolyseur est directement proportionnelle à la vitesse de transfert des électrons au niveau des électrodes, qui à son tour est équivalente à la courant électrique dans le circuit extérieur. Par conséquent, le taux de production totale d'hydrogène dans un électrolyseur, qui se compose de plusieurs cellules connectées en série. Les débits d'hydrogène et d'oxygène consommés par une pile ou produits par un électrolyseur (Équation 65) et (Équation 66) sont directement proportionnels à l'intensité et au rendement faradique de l'appareil selon les équations suivants :

✓ Pile à combustible

$$F_{gaz} = \frac{n_c \times I}{n \times F} \times \eta_F \quad \text{Équation 65}$$

✓ Electrolyseur

$$\mathbf{F_{gaz}} = \frac{n_c \times I}{n \times F} \times \frac{1}{\eta_F}$$

Équation 66

Avec

F_{gaz} : flux de gaz (mol/s)

n_c : nombre de cellules

I : intensité du courant de l'appareil

η_F : rendement faradique (%) et n le nombre de moles d'électrons échangées par mole d'eau ($n = 2$ pour l'hydrogène, $n = 4$ pour l'oxygène).

Pour modéliser le rendement faradique, il existe un modèle universel dans littérature donnée par la relation suivante :

$$\eta_F = \zeta_1 \exp \left(\frac{\zeta_2 + \zeta_3 T + \zeta_4 T^2}{I/A_c} + \frac{\zeta_5 + \zeta_6 T + \zeta_7^2}{(I/A_c)^2} \right)$$

Équation 67

Avec

ζ_1 : Paramètre du faraday ($i=1 \dots 5$)

T : température de la pile à combustible ou électrolyseur, [°C]

I : courant de composant, [A]

A_c : surface de l'électrode, [m²]

III.5 Stockage gaz

Le stockage des gaz est modélisé par le modèle du gaz réels de Van der Waals :

$$\mathbf{P} = \frac{n \times R \times T}{V - n \times b} - a \times \frac{n^2}{V^2}$$

Équation 68

$$\mathbf{a} = + \frac{27 \times R^2 \times T_{cr}^2}{64 \times P_{cr}}$$

Équation 69

Et

$$\mathbf{b} = \frac{R \times T_{cr}}{8 \times P_{cr}}$$

Équation 70

Avec P est la pression (Pa), n le nombre de mole (mol), R constante des gaz parfaits ($8,314 \text{ J.K}^{-1}\text{mol}^{-1}$), T température (K) V volume du stockage (m^3), T_{cr} température critique ($^{\circ}\text{K}$), P_{cr} pression critique (Pascal)

III.6 Conclusion

Pour la raison du coût élevé de l'expérimentation (méthodes d'élaboration et techniques de fabrication), les chercheurs ont souvent cherché à faire la modélisation vu que c'est un outil efficace pour étudier un système de physique quelconque. Pour cela on a consacré ce chapitre juste pour faire un modèle analytique permettant une bonne compréhension des phénomènes qui se déroulent dans toutes les éléments de notre système, pour connaître les paramètres intervenant dans la conception PV-PAC.

CHAPITRE

VI

Dimensionnement et simulation du système étudié

IV. Chapitre IV : Dimensionnement et simulation du système étudié

IV.1 Introduction

Dans le PV autonome, l'énergie est générée uniquement par les panneaux photovoltaïques. Par conséquent dans la nuit ou dans les périodes du faible rayonnement solaire, il est essentiel de trouver un moyen de stockage de l'énergie pour assurer l'alimentation en électricité. Nous avons effectué dans ce travail une comparaison entre deux systèmes photovoltaïques : le premier est classique et qui utilise des batteries pour le stockage, le second utilise l'hydrogène comme moyen de stockage. Le dimensionnement du système PV-PAC exige la détermination des caractéristiques de la source et du système de stockage pour des ressources énergétiques données et un profil de charge imposé.

La première partie de ce chapitre présente succinctement les caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Toujounine à Nouakchott en Mauritanie, Ainsi que les caractéristiques techniques et économiques de chaque composant des deux systèmes.

Dans la seconde partie on va discuter les résultats du dimensionnement des deux systèmes. Sachant que Les résultats présentés dans ce chapitre sont basées sur une analyse technico- économique effectuée sous HOMER.

IV.2 Utilisation du logiciel HOMER

HOMER (Hybrid Optimisation of Energy Ressources) est un logiciel de simulation d'optimisation destiné à l'étude d'installation de production d'énergie multi – sources (éolien, PV , stockage, diesel...), Il est principalement destiné à la simulation de mini-réseaux connecté ou non –connectés (off-grid) . Il a été développé en premier lieu par le national Renewable Energy lab dépendent lui-même du ministère américain de l'énergie. L'entreprise Homer Energy a été spécialement créé pour sa commercialisation et ensuite de son développement [36]. Il effectue des simulations horaires de toutes les combinaisons possibles de composants saisis et classe les systèmes en fonction de critères définis par l'utilisateur, tels que le coût de l'énergie (COE) ou les coûts en capital (CC). Homer a été largement utilisé comme outil de dimensionnement et d'optimisation [37]. En dernier temps, HOMER peut modéliser l'impact des variables qui sont hors de contrôle, tel que le vent, la vitesse, les coûts de carburant...etc, et de voir comment le système optimal change avec ces variations : C'est l'analyse de sensibilité.



Figure 12: Les opérations principales de HOMER

IV.3 Création du système:

Les systèmes étudiés dans notre cas sont illustrées ci-dessous :

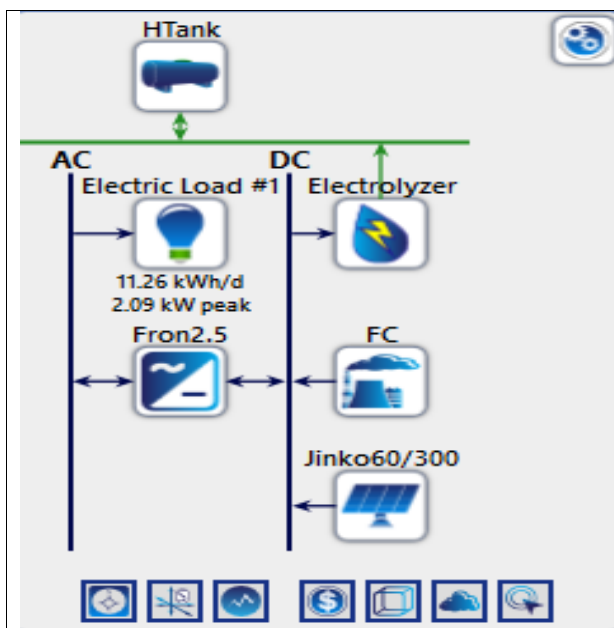


Figure 13: Description du système

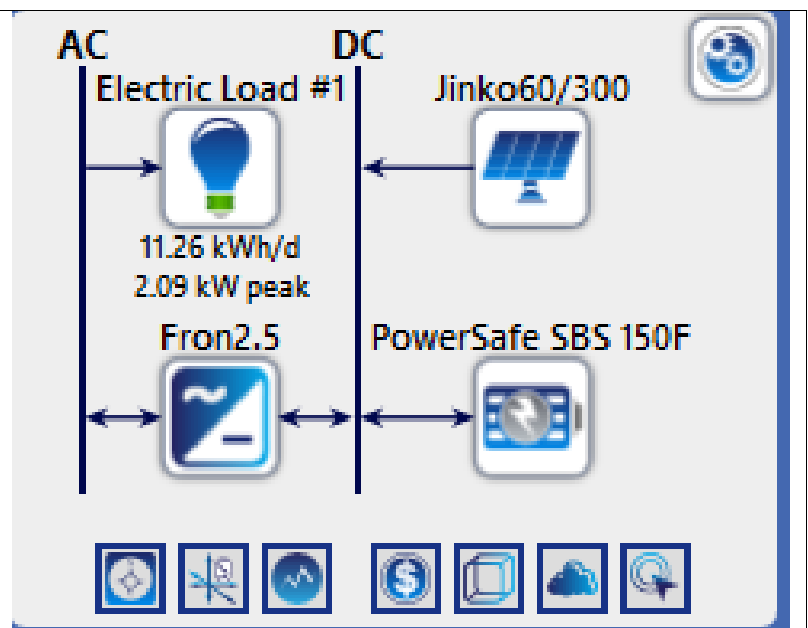


Figure 14: Description du système

IV.4 Caractéristique de la région de Nouakchott [38] :

Le dimensionnement du système PV-PAC est basé sur les données météorologiques et géographiques effectuées pour le site de Nouakchott.

IV.4.1 Données géographiques

La Mauritanie se trouve dans l'hémisphère nord et s'étend entre le 15ième et le 26ième degré de latitude Nord et le 5ième et le 16ième degré de longitude Ouest. Concernant le climat typique on distingue trois régions différentes:

- Le nord avec un climat de type désertique, sec et extrêmement chaud (les températures peuvent atteindre 50 degrés);

- La région sud près du fleuve Sénégal dispose d'un climat chaud et humide. La saison pluvieuse s'étend de juillet à septembre avec des précipitations jusqu'à 400 mm ;
- Les températures de la région côtière sont plus modérées, à cause du "Courier des Îles Canaries" qui apporte des airs plus frais et cause fréquemment des brouillards dans les régions côtières.

Concernant les informations sur le rayonnement, il faut distinguer les données mesurées au sol et les données calculées en utilisant des modèles climatiques et les informations fournies par les satellites. Les mesures sont ponctuelles et peuvent représenter des effets très localisés, de plus la période de mesures fiable est souvent assez limitée à cause d'instruments défectueux. On peut observer des erreurs à cause de la défaillance de l'enregistrement, particulièrement en cas d'enregistrement manuel des données de radiation dans les stations météorologiques.

Location de notre étude : Toujounine , Nouakchott, 34F2+5PC, Nouakchott, Mauritanie (18°4.4'N, 15°53.9'W)

IV.4.2 Donnée météorologiques

A. Variation mensuelle de l'irradiation

A l'aide du logiciel HOMER et des valeurs du facteur d'éclairement et des caractéristiques du site mesure précédente, l'irradiation journalière moyenne pour chaque mois de l'année est déterminée. Les résultats sont au tableau.

Table 8:l'irradiation journalière moyenne pour chaque mois de l'année

Mois	Facteur d'éclairement	radiation (kWh/m² /j)
Janvier	0.571	4.440
Février	0.584	5.080
Mars	0.594	5.810
Avril	0.577	6.080
Mai	0.544	5.900
Juin	0.513	5.570
Juillet	0.513	5.550
Aout	0.514	5.450
Septembre	0.524	5.240

Octobre	0.522	4.690
Novembre	0.540	4.300
Décembre	0.547	4.080

La figure suivante illustre l'évaluation mensuelle de l'irradiation à la région de Nouakchott /Toujounine que celle du facteur d'éclairement (en bleu).

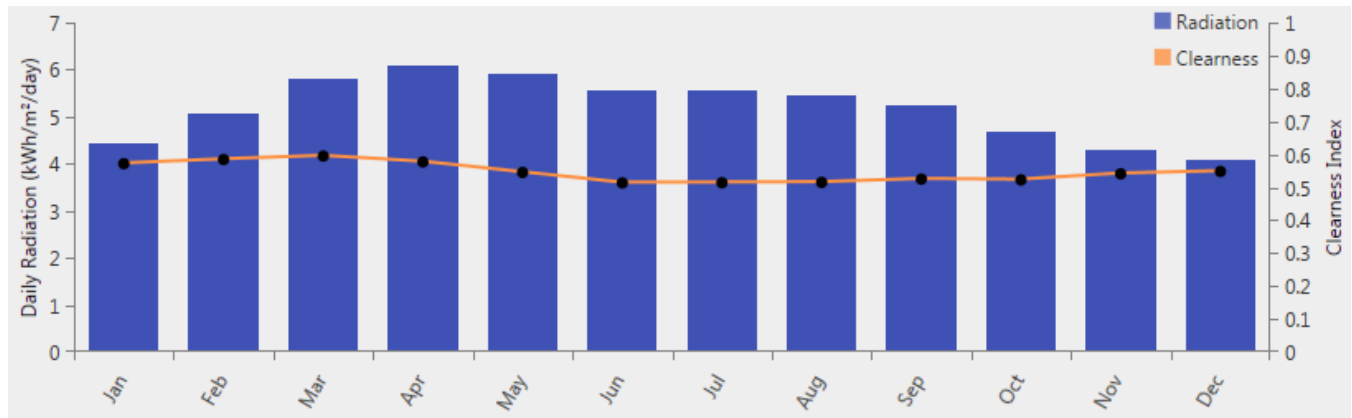


Figure 15:l'irradiation journalière moyenne pour chaque mois de l'année

B. Température moyenne

Le graphe et le tableau représentent la variation de température moyenne mensuelle à la région de Nouakchott.

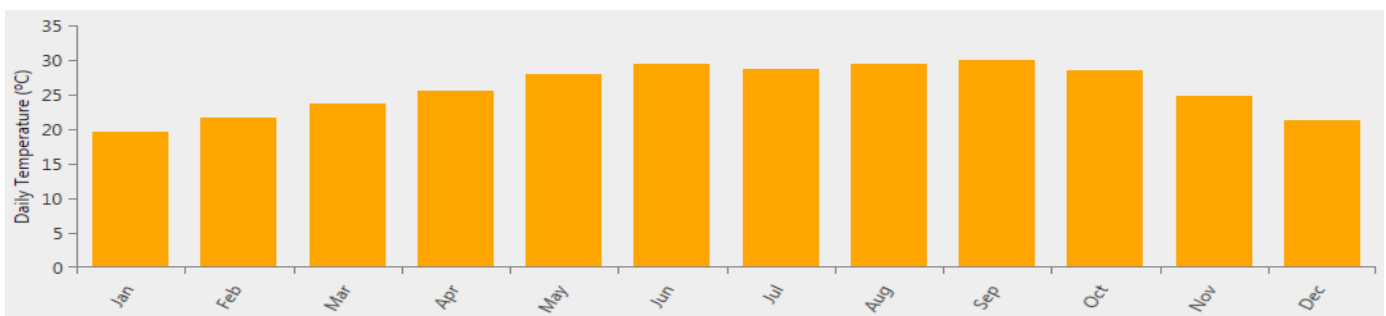


Figure 16:Température moyenne mensuelle à la région de Nouakchott

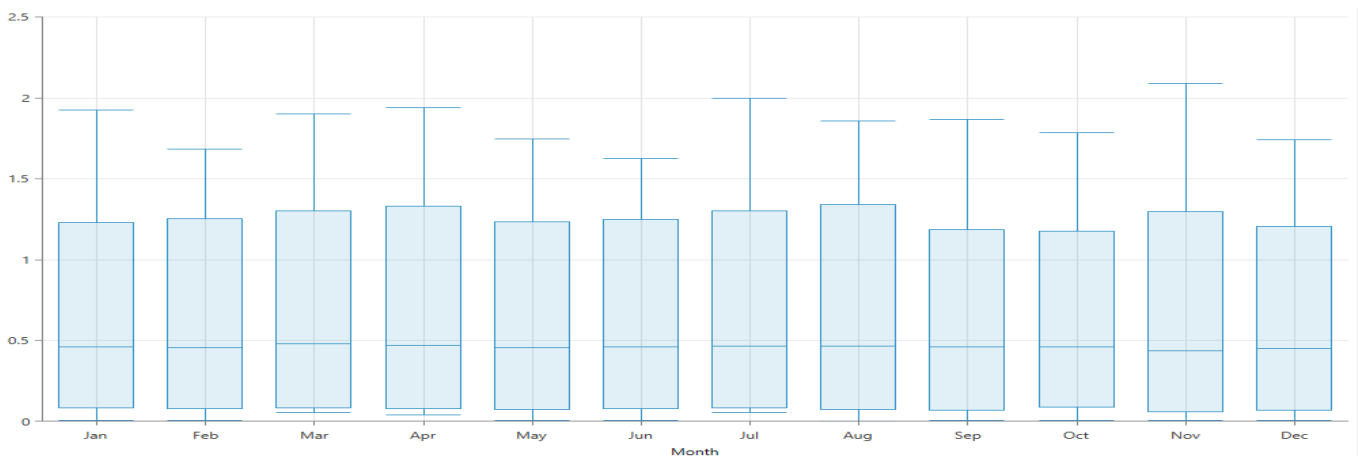
La température dans la région de Nouakchott on varie avec tout mois d'année, le maximum de la température en été (Juin 29.500°C, Juillet 28.670°C, Aout 29.460°C et septembre 30.090°C) et le minimum pour hiver (Décembre 21.300°C, Janvier 19.680°C, Février 21.710°C).

Table 9:Température moyenne mensuelle à la région de Nouakchott

Mois	Température (°C)
Janvier	19.680
Février	21.710
Mars	23.700
Avril	25.580
Mai	27.960
Juin	29.500
Juillet	28.670
Aout	29.460
Septembre	30.090
Octobre	28.600
Novembre	24.870
Décembre	21.300

C. Profils de charge

Notre choix est une maison à Nouakchott. On note, que l'énergie consommée est alors d'environ 11.26kWh/j, soit une puissance crête de 2.09 kW.

**Figure 17:Profile de charge mensuelle**

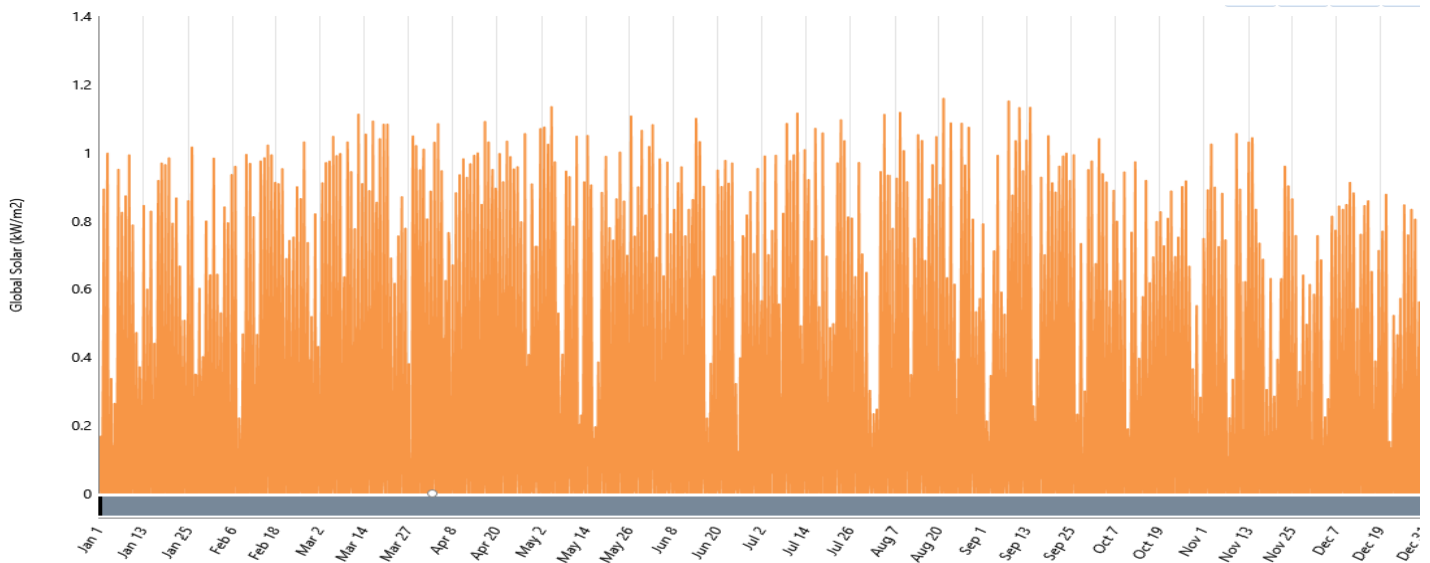


Figure 18: Irradiation solaire mensuelle globale pour la région de Nouakchott

La consommation électrique est variée d'un mois à un autre et d'une saison à une autre. La consommation prend des valeurs maximales à l'été (mois juillet) et égale à la puissance crête (1.11kW), et prend aussi la valeur le plus bas dans l'hiver (durant le mois de janvier) avec une valeur égale à 0.29kW.

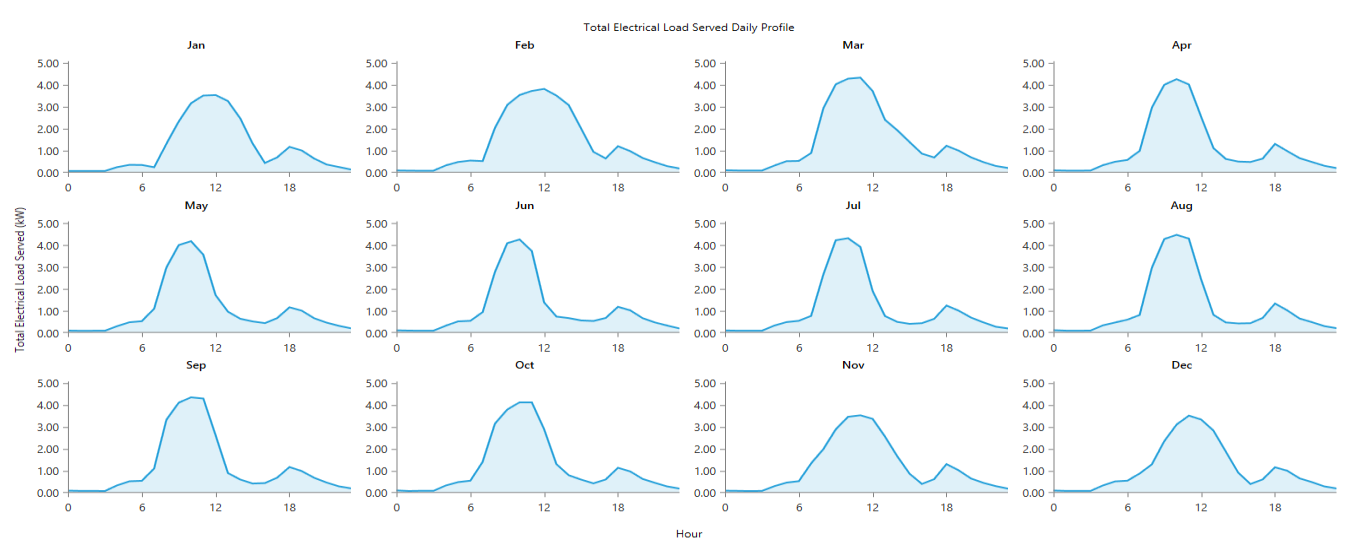


Figure 19: Variation journalier du profil de charge pour chaque mois

IV.5 Caractéristiques techniques et économiques des composants utilisés

IV.5.1 Panneau photovoltaïque:

L'irradiation sur une surface parfaitement orientée est supérieure à l'irradiation sur une surface horizontale, en fonction des parties partiellement ou directement irradiées et de la latitude. En basses l'altitude, par ex. dans le sud de la Mauritanie, le gain est de seulement 3% environ contre environ 5% dans le nord. L'orientation optimale dépend également de ces deux facteurs, un angle d'inclinaison qui correspond à la latitude est une bonne approximation pour une inclinaison optimale. Toutefois, en réalité, Une inclinaison minimum d'environ 20° doit être respectée afin de réduire les sédimentations [38]. Le coût initial et de remplacement des panneaux photovoltaïque étant de 1100 US\$ / KW [39]. Et le coût de maintenance est de 10 US\$, et La durée de vie des panneaux PV 25 ans, le rendement de la cellule est considéré de 13% dans la condition standard, le panneau est fixé à l'angle d'altitude de Nouakchott.

IV.5.2 Électrolyseur

La technologie d'électrolyse choisie dans notre étude est : L'électrolyse PEM. Les autres technologies (exemple d'électrolyse alcaline) ne s'accommode pas à un régime discontinu, donc de la seule alimentation électrique à partir de renouvelable intermittent.

Le coût de l'électrolyseur est de 700 US\$/kW, le coût de remplacement est de 700 US\$/kW et le coût de maintenance considéré pratiquement nul US\$/an [39]. La durée de vie est de 25 ans, et l'efficacité considérée est de 85%. Et le taux de charge minimal est de 10%.

IV.5.3 Convertisseur

Dans le système étudié, Les sources d'énergie sont toutes basées sur le courant continu, mais la charge est basée sur le courant alternatif. On a utilisé les onduleurs pour transformer le CC produit par les générateurs photovoltaïque et les piles à combustible en CA pour alimenter la charge.

Le coût initial et le coût de remplacement par kilowatt d'onduleur sont considérés 300 US\$ [39]. Le rendement d'onduleur 95%.

IV.5.4 Réservoirs d'hydrogène

L'hydrogène stocké doit être suffisamment suffisant pour subvenir aux besoins des piles à combustible, Le coût du réservoir et son cout de remplacement est de 1100 US\$/kW, alors que le coût de maintenance est 10 US\$/an [39]. Sachant que La durée de vie est 25 ans avec un volume de réserve de 10%

IV.5.5 Piles à combustible

Les piles à combustible doivent être d'une puissance pour alimenter le maximum de la demande énergétique de la charge. Pour le coût des piles à combustible varie selon le type de la technologie, de la taille, des auxiliaires installés, ... etc. Le coût de pile à combustible est 500 \$/ KW [39]. Et Le coût de remplacement est de aussi de 500 US\$ et de maintenance de 0.10 US\$ / h. La durée de vie est de 40000 heures de fonctionnement, le rendement est de 42%.

IV.5.6 Batteries

On intègre les batteries dans notre système pour le stockage de l'énergie des générateurs photoélectriques afin d'assurer l'alimentation pendant la nuit.

Le type des batteries utilisé dans ce système est les batteries de l'EnerSys PowerSafe SBS 150F. De tension de 12 V et une capacité de 170Ah. Le rendement aller-retour est de 97 %. La durée de vie minimale de batterie est de 35ans, qui peut varier en fonction du nombre de cycles de charge. Le coût initial et le coût de remplacement de chaque batterie sont considérés 300 US\$[39]. Le coût de fonctionnement et de maintenance des batteries est 5 US\$.

IV.6 Dimensionnement et Optimisation

Le dimensionnement nous permet de déterminer la puissance de chaque composant. Ainsi que la capacité des unités de stockage selon les lois suivantes :

- ❖ La surface solaire est dimensionnée pour que le système soit autonome.
- ❖ Le volume de stockage de gaz dépend du site, de la puissance solaire et de la capacité des batteries. Il est surtout sensible à la différence d'ensoleillement entre l'été et l'hiver.
- ❖ La puissance de l'électrolyseur est la différence entre la puissance du PV et la puissance minimale de la charge afin de convertir tout l'excédent de la production solaire.
- ❖ La puissance de la pile à combustible doit correspondre à la puissance maximale de la charge plus la puissance nécessaire à la recharge rapide des batteries de sécurité.

Lors d'exécution, HOMER PRO utilise plusieurs propositions de dimensionnement en choisissant les meilleurs résultats pour chaque calcul, en tenant compte plus précisément le point de vue économique. L'optimisation du système a pour but est de déterminer la valeur optimale de chaque composant afin d'avoir la meilleure solution de dimensionnement pour notre système.

Voici les variables de dimensionnement qu'il faut introduire dans notre simulation sont:

- La puissance crête de la surface photovoltaïque;
- La puissance nominale des piles à combustible;
- La puissance nominale des convertisseurs;
- La puissance nominale des électrolyseurs;
- La taille du système de stockage d'hydrogène.

IV.7 Interprétation des résultats de simulation

IV.7.1 Système PV-Batterie

Ce système est compose d'un champ PV et un système de stockage (batterie). La meilleure configuration de ce système est illustre dans la figure au-dessous :

Architecture			Cost				System		
  	Jinko60/300 (kW)	PowerSafe SBS 150F	Fron2.5 (kW)	NPC (US\$)	COE (US\$)	Operating cost (US\$/yr)	Initial capital (US\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)
  	3.38	12	2.50	US\$11,394	US\$0.207	US\$243.42	US\$8,063	100	0

Figure 20:configuration du système PV-Batterie en fonction du coût net actuel.

Le tableau. Représente la composition de ce système ainsi que la taille de chaque élément.

Tabel 10:composition du système PV-Batterie.

Puissance crête du champ PV [kW]	Puissance nominale du convertisseur [kW]	Puissance nominale du Batterie [kW]
3.38	2.50	12

La production énergétique du système PV-Batterie est présente à la figure suivant :

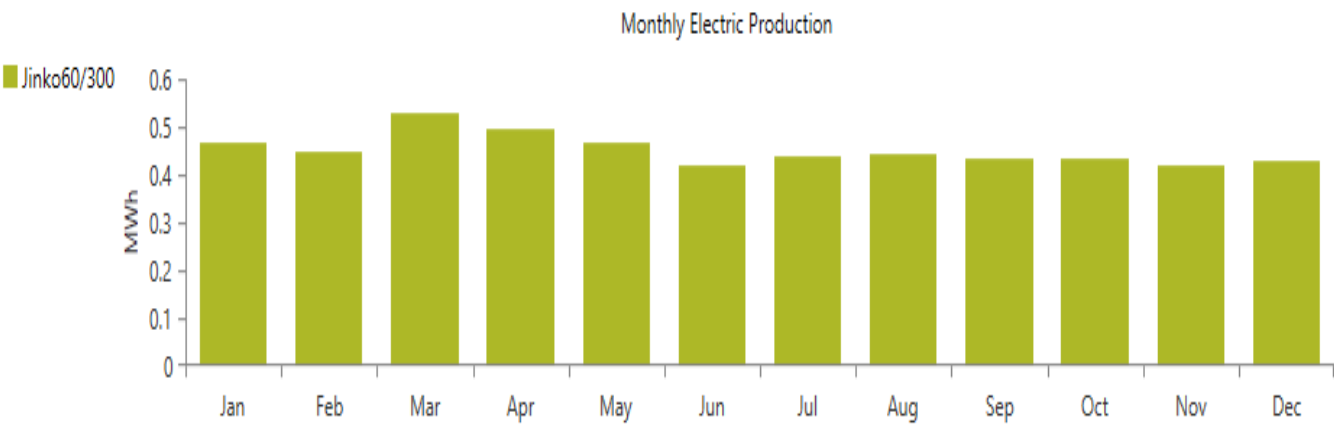


Figure 21:production énergétique mensuelle du système PV-Batterie..

Tableau. Bilan énergétique du système PV-Batterie.

Tabel 11:Bilan énergétique du système PV-Batterie.

Composant	Production	Excès
	PV	
Energie [kWh/an]	5.414	1.117
[%]	100	20.6

Dans ce tableau, on note que la production totale est 5.414 kWh/an,

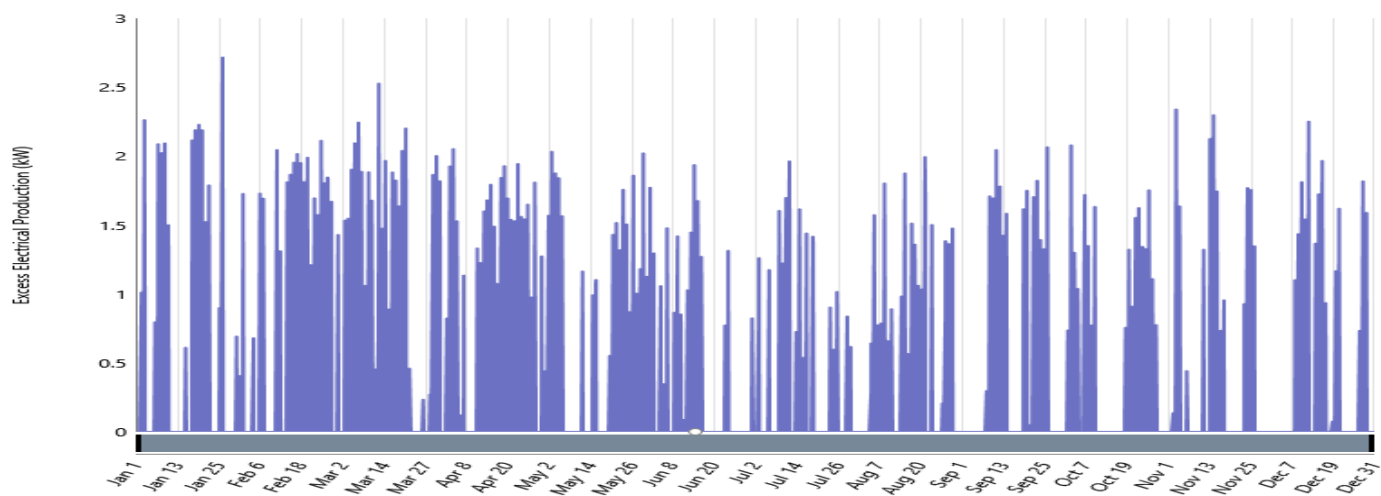


Figure 22:Excès énergétique mensuelle pour le système PV-Batterie.

L'excès énergétique est important (fig) est de l'ordre de 20.6%. Il est dû au dimensionnement du volume de stockage pendant le mois le plus défavorable

A. Production du champ PV:

En présente dans figure suivant la production énergétique mensuelle du champ PV.

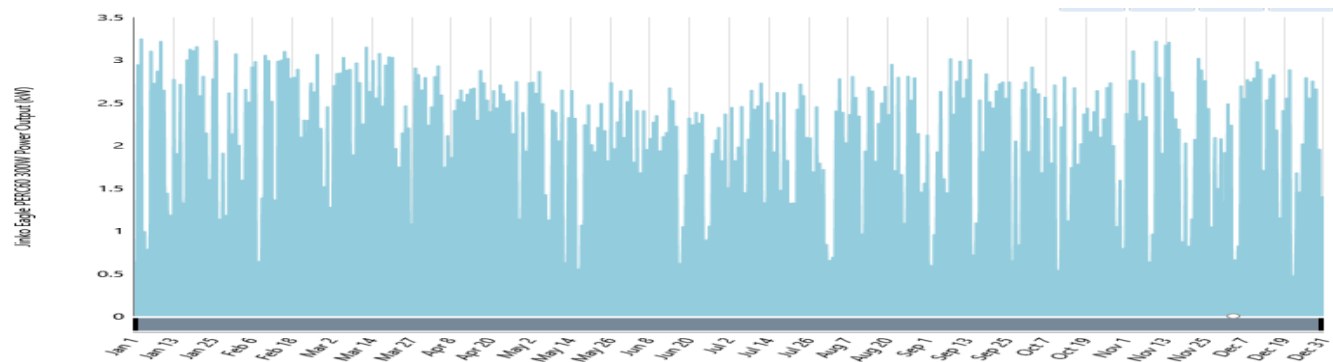


Figure 23:Energie photovoltaïque mensuelle produite par les panneaux photovoltaïques dans le système PV-Batterie

B. Production énergétique de batterie:

Les Batteries fonctionnent quand la demande énergétique est supérieure à la production photovoltaïque.

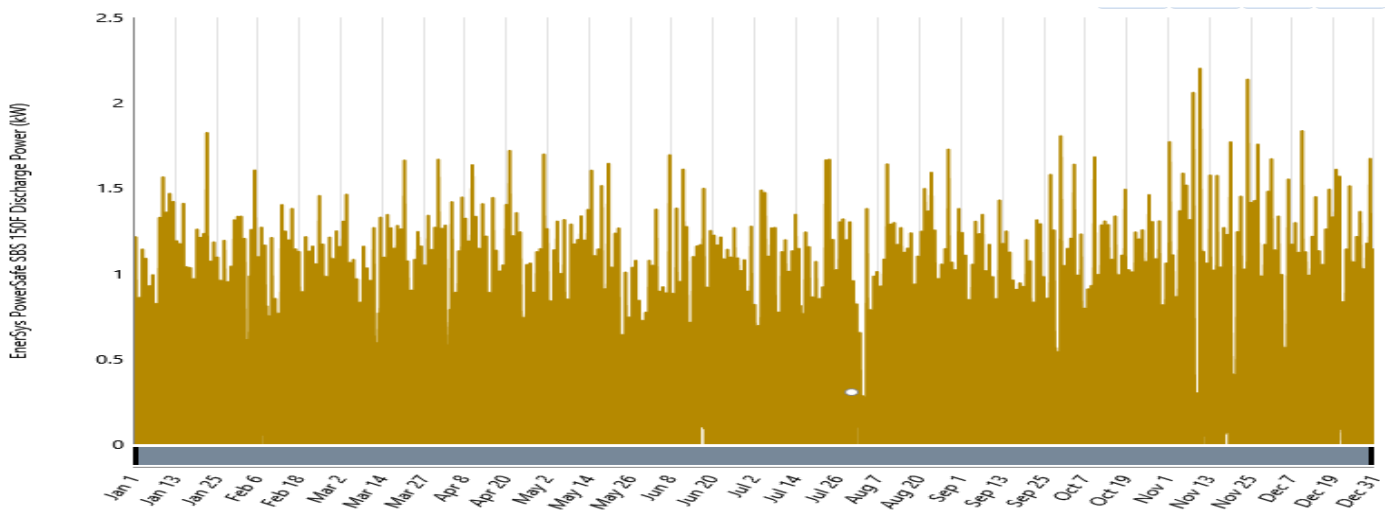


Figure 24: Production énergétique mensuelle de la batterie pour le système PV-Batterie

C. Bilan économique

L'étude économique de ce système est détaillée au tableau. Le coût de chaque élément du système ainsi que le coût total en euro :

Table 12: Coût de chaque composant du système PV-Batterie

Composant	PV	Convertisseur	Batterie	Système
Coût [US\$]	3712.50	7 50. 00	3600.00	8062.50

IV.7.2 Système PV- PAC

Notre système PV-PAC est composé d'un champ PV, Electrolyseurs et d'une unité de piles à combustible. Après le démarrage de calcul d'optimisation, le logiciel HOMER choisi la meilleure configuration comme illustre la figure suivante:

Architecture							Cost				System	
Jinko60/300 (kW)	FC (kW)	Electrolyzer (kW)	HTank (kg)	Fron2.5 (kW)	NPC (US\$)	COE (US\$)	Operating cost (US\$/yr)	Initial capital (US\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (kg/yr)		
10.0	2.00	4.00	5.00	2.00	US\$44,042	US\$0.686	US\$1,342	US\$22,900	100	135		

Figure 25: configuration choisit du système PV-PAC

Le tableau résume la composition de ce système ainsi que la taille de chaque élément.

Table 13: composition du système PV-PAC

Puissance crêtedu champ PV [kW]	Puissance nominale du convertisseur [kW]	Puissance nominale de l'électrolyseur [kW]	Taille du réservoir d'H ₂ [kg]	Puissance nominale de la PAC [kW]
10	2	4	5	2

Présente la production mensuelle électrique du système PV-PAC dans la figure suivante.

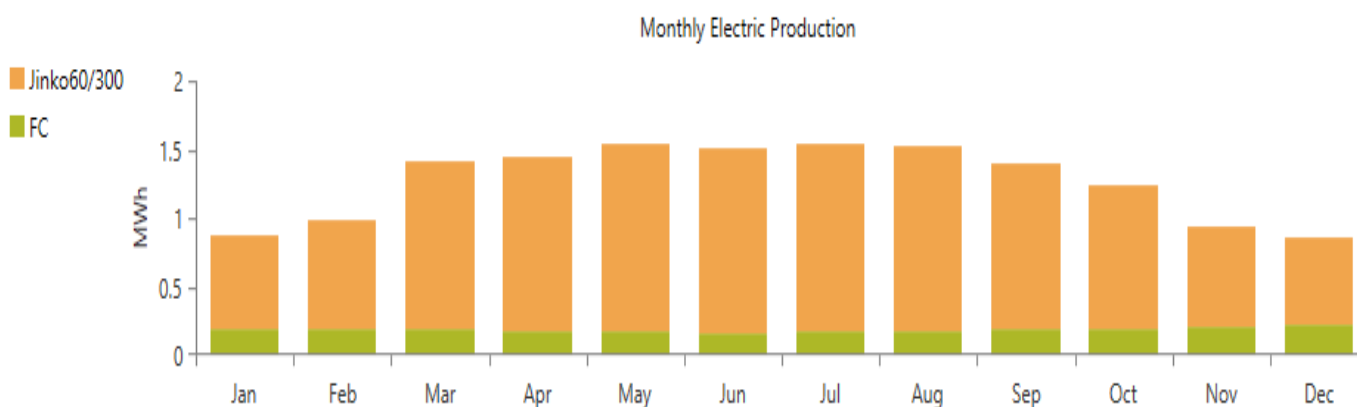


Figure 26:production énergétique mensuelle du système PV-PAC

On représente le bilan énergétique du système PV-PAC le tableau suivant :

Table 14:Bilan énergétique du système PA-PAC.

Composant	Production		Excès
	PV	PAC	
Energie [kWh/an]	12.979	2.247	4.667
[%]	85.2	14.8	30.7

Ce tableau, montre que 85,2% de l'énergie annuelle produite par le système est de Source photovoltaïque, tandis que seulement 14.8% est produit par les piles combustible.

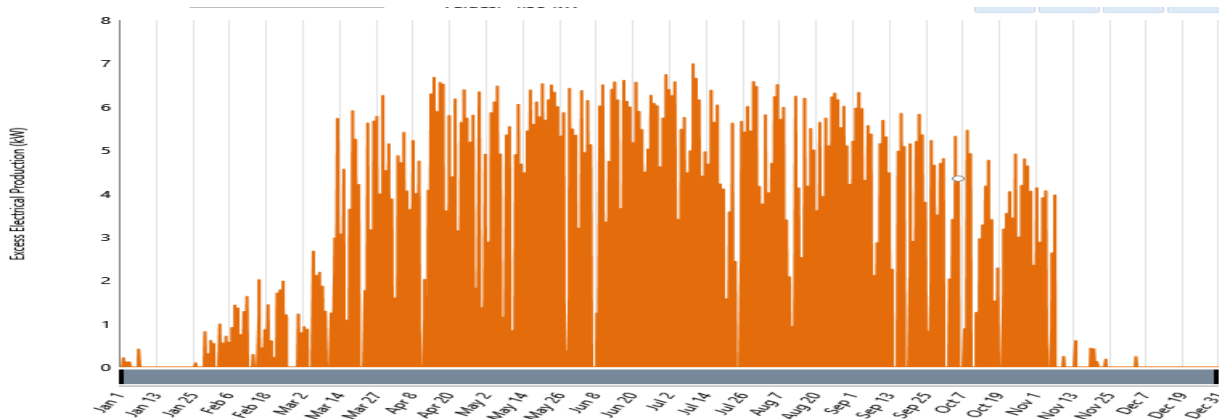


Figure 27:Excès énergétique mensuelle pour le système PV-PAC.

L'excès énergétique est important (fig.27) est de l'ordre de 30.7 %. Il est dû au dimensionnement du volume de stockage pendant le mois le plus défavorable.

A. Production des champs photovoltaïques

La figure suivante illustre la production énergétique mensuelle du champ PV :

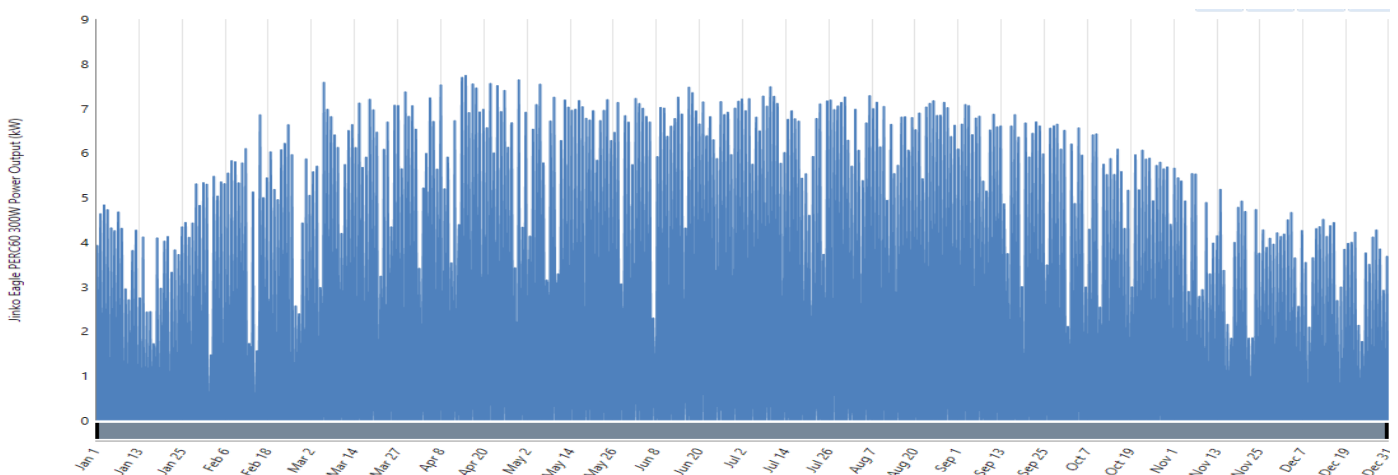


Figure 28:Energie photovoltaïque mensuelle produite par les panneaux photovoltaïques dans le système PV-PAC

B. Production d'hydrogène:

Les électrolyseurs fonctionnent quand la production photovoltaïque est supérieure à la demande énergétique de la charge.



Figure 29: Quantité d'hydrogène produite en fonction de l'énergie photovoltaïque du système PV-PAC.

L'électrolyseur consomme plus d'énergie pendant le mois de Février et Mars à cause de la demande importante de l'hydrogène pour le fonctionnement de la pile à combustible. La figure 30 représente la consommation mensuelle de l'électrolyseur pour le système PV-PAC.

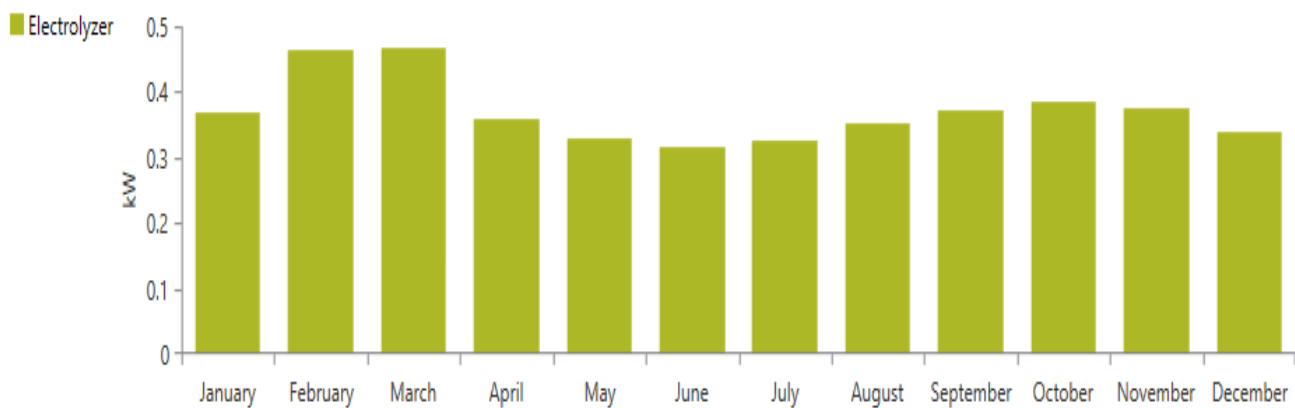


Figure 30: Consommation énergétique mensuelle de l'électrolyseur pour le système PV.PAC

La quantité d'hydrogène produite dépend de l'énergie consommée par les électrolyseurs. La figure 32. Représente la moyenne mensuelle de la production annuelle d'hydrogène.

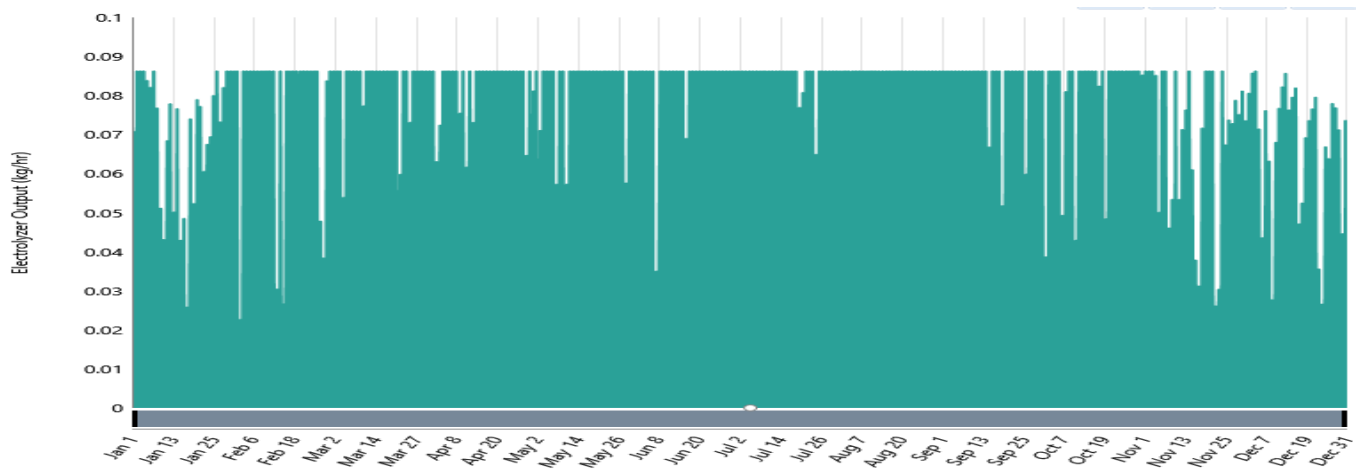


Figure 31: Quantité mensuelle d'hydrogène produite par l'électrolyseur pour le système PV- PAC

C. Production énergétique des piles à combustible:

Les piles à combustible fonctionnent quand la demande énergétique est supérieure à la production photovoltaïque. La figure au-dessous représente l'énergie annuelle produit par les piles à combustible.

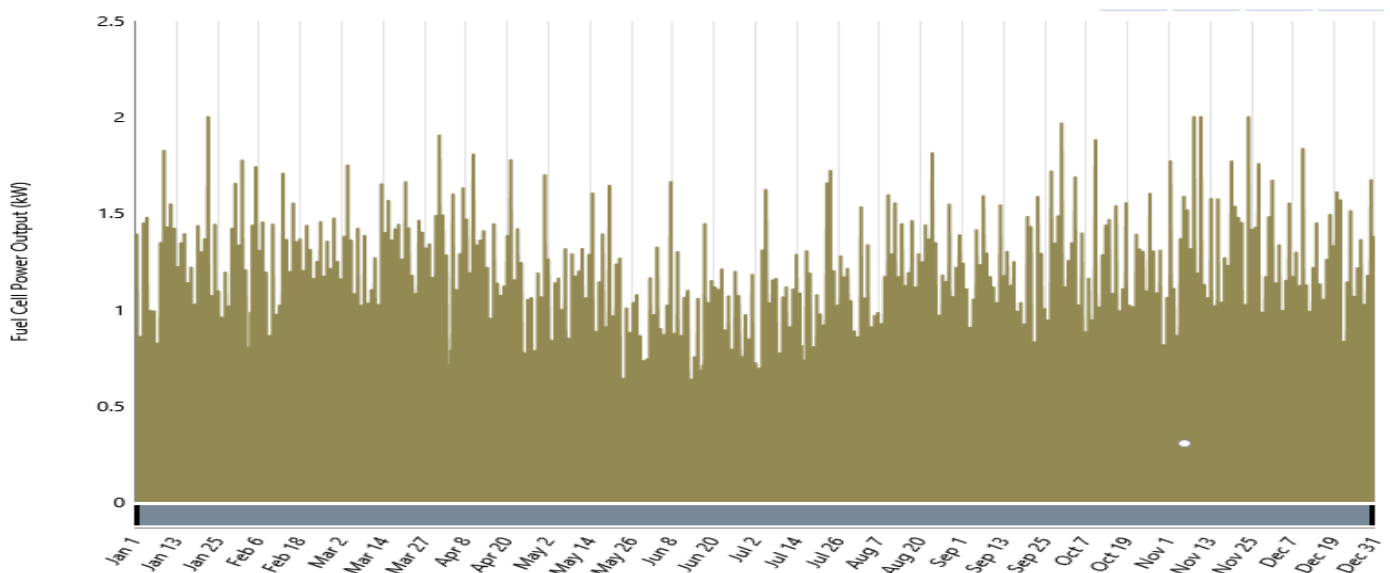


Figure 32: Production énergétique mensuelle de la pile à combustible pour le système PV- PAC.

D. Bilan économique:

L'étude économique de ce système est détaillée au tableau. Le coût de chaque élément du système ainsi que le coût total en euro.

Tabel 15: Coût de chaque composant du système PV-PAC.

Composant	PV	Conv	Hydrogène		PAC	Système
Coût [US\$]	11000.00	700.00	Elec	Res H ₂	1000.00	22900.00
			2800.00	7500.00		

IV.7.3 Comparaison entre les deux systèmes

Table 16: Comparaison entre les systèmes

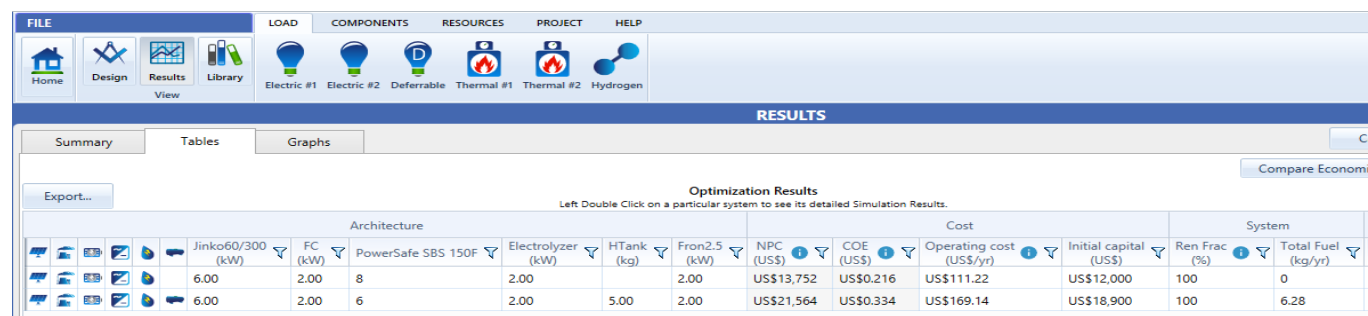
	PV	Convertisseur	Batterie	PAC			Coût total	Production	Charge	Manque de	Emission	Excisé d'énergie
				H ₂	PA C	Electrolyseur						
PV-PAC	10 Kw	2 Kw		5 kg	2 kW	4 kW	22900.00 US\$	12.979k Wh /an			1.38 kg /an	1.117 kW h/ans
PV-Batterie	3.38 k W	2.5 kW	12k W				8062.50 US\$	5.414 kWh/an			0	4.667 kWh/an

En comparant les deux systèmes, on remarque que le coût total du système PV-Batterie est faible (8062.50 US\$). Par rapport le système PV-PAC (22900US\$) d'énergie dans le système PV-Batterie (5.414kWh/an) et système PV-PAC (12.979kWh/an).

Il y a aussi des périodes où l'utilisation d'un système de stockage est plus efficace que l'autre, c'est pourquoi nous proposons une solution plus performante économiquement et techniquement (en termes de durée de vie et coût de maintenance....et etc.) qui intègre les deux systèmes pour une meilleure alimentation sur les quatre saisons de l'année.:

IV.8 Résultat de simulation

Voici le résultat de notre étude de faisabilité technico-économique et environnementale visant à trouver la configuration optimale d'un système hybride renouvelable pour répondre à la demande :



Le tableau ci-dessous résume tous les paramètres de fonctionnement du générateur photovoltaïque étudié :

PV: Jinko Eagle PERC60 300W

Jinko Eagle PERC60 300W Electrical Summary

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	4.64	kW
PV Penetration	190	%
Hours of Operation	4,114	hrs/yr
Levelized Cost	0.0615	US\$/kWh

Jinko Eagle PERC60 300W Statistics

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	6.00	kW
Mean Output	0.889	kW
Mean Output	21.3	kWh/d
Capacity Factor	14.8	%
Total Production	7,787	kWh/yr

Jinko Eagle PERC60 300W Output (kW)

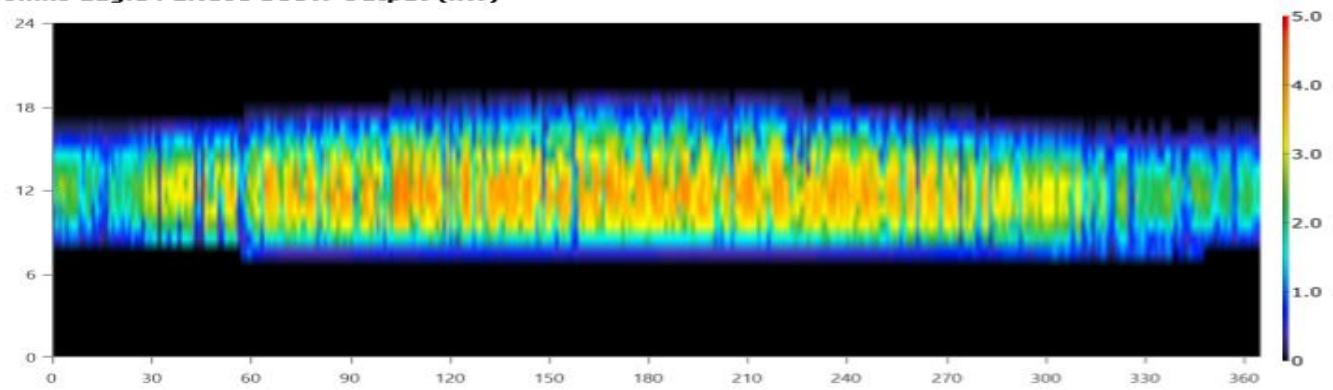


Figure 33:la configuration optimale d'un système hybride renouvelable

L'interprétation de ce figure et selon l'échelle à droite, s'explique comme la suite :

- ❖ la couleur noir : représente les périodes de l'arrêt du générateur PV.
- ❖ La couleur bleu : pour les périodes à très faible production

- ❖ le jaune : pour celles à forte production
- ❖ la couleur rouge : montre les deux pics durant les mois de l'été à -peu près- dans les heures 12h à 13h.
- ❖ la couleur verte : représente la production moyenne.

La figure suivante montre la puissance de sortie des panneaux PV en un an avec la consommation et l'excès annuelle d'électricité.

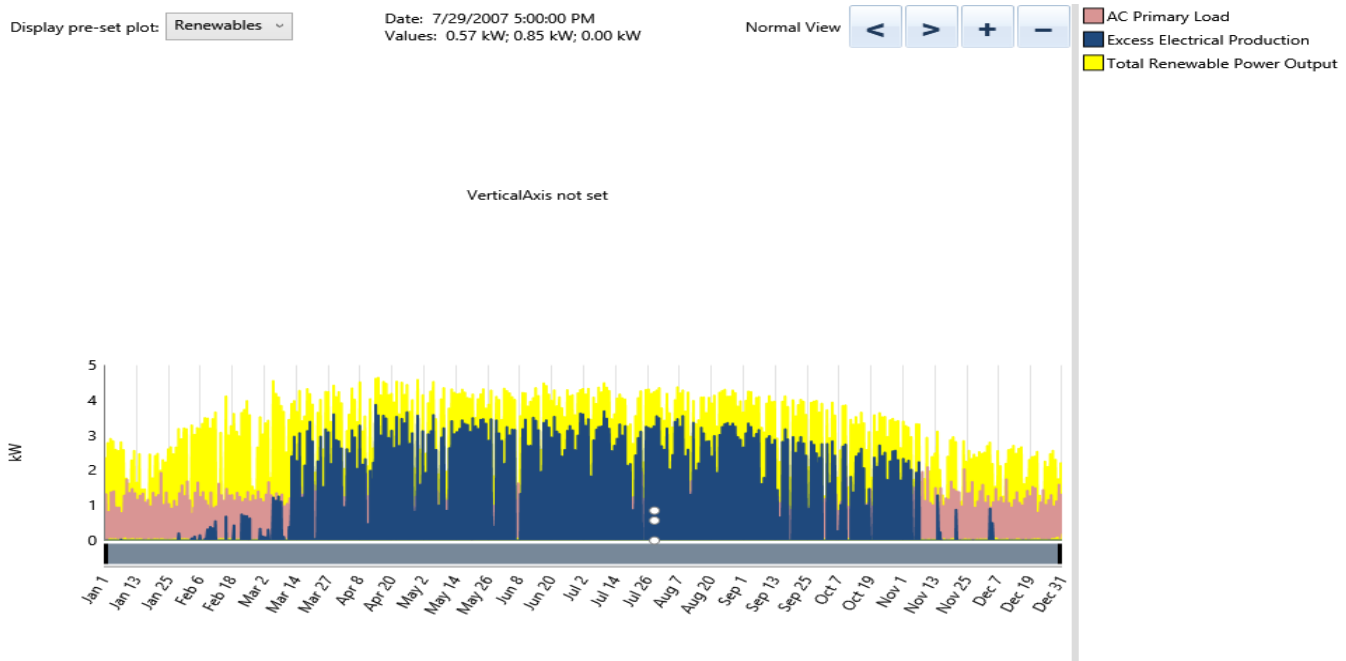


Figure 34: la puissance de sortie des panneaux PV en un an avec la consommation et l'excès annuelle d'électricité.

A partir de la figure précédente, l'excès annuel en électricité est estimé à 3.081 kWh/an, soit environ 39% de la production énergétique totale. Dans ce cas, l'excès peut être aussi utilisé pour couvrir les besoins en énergie lors de l'extension et l'augmentation de consommation.

IV.8.1 Performance de batterie

Les batteries sont utilisées pour stocker l'excédent d'électricité et fournissent cette énergie en cas de pénurie. Si des batteries de stockage sont utilisées, cela se fait à des moments précis:

Storage: EnerSys PowerSafe SBS 150F**EnerSys PowerSafe SBS 150F Properties**

Quantity	Value	Units
Batteries	8.00	qty.
String Size	1.00	batteries
Strings in Parallel	8.00	strings
Bus Voltage	12.0	V

EnerSys PowerSafe SBS 150F Result Data

Quantity	Value	Units
Average Energy Cost	0	US\$/kWh
Energy In	2,361	kWh/yr
Energy Out	2,300	kWh/yr
Storage Depletion	9.82	kWh/yr
Losses	71.0	kWh/yr
Annual Throughput	2,335	kWh/yr

EnerSys PowerSafe SBS 150F Statistics

Quantity	Value	Units
Autonomy	24.4	hr
Storage Wear Cost	0	US\$/kWh
Nominal Capacity	16.3	kWh
Usable Nominal Capacity	11.4	kWh
Lifetime Throughput	17,423	kWh
Expected Life	7.46	yr

La figure suivant montre que l'état de charge de la batterie en un an :

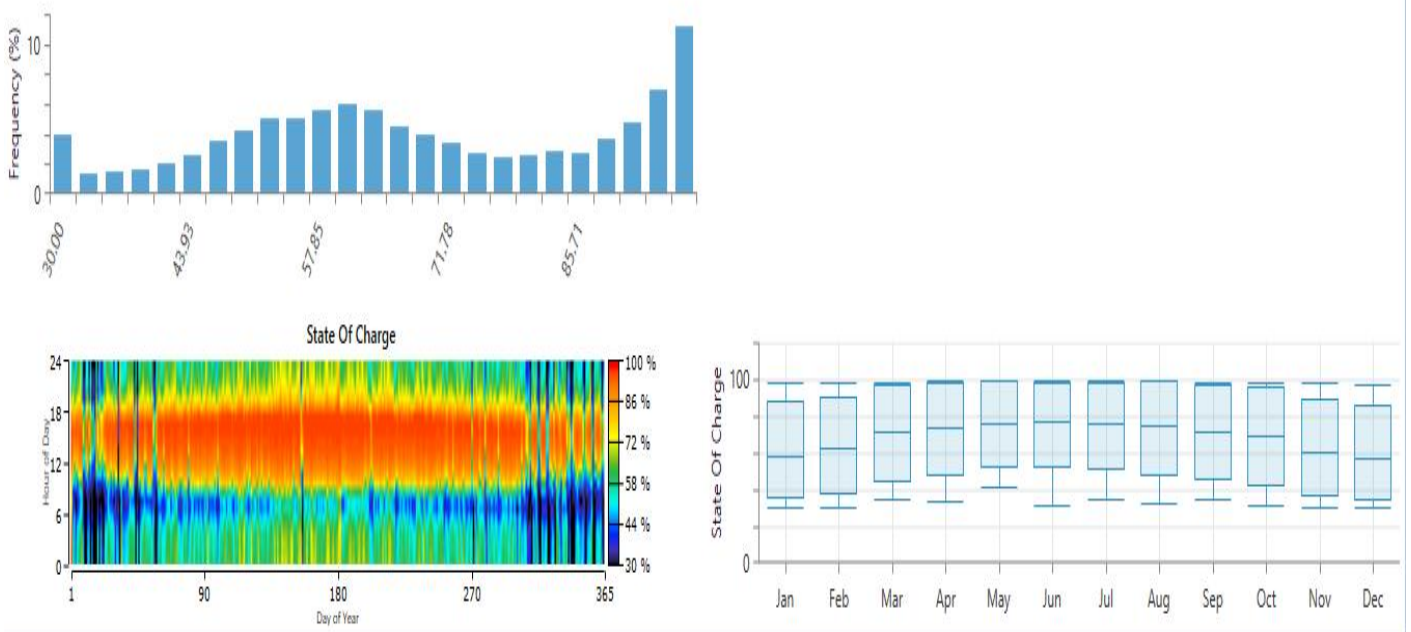


Figure 35:La figure suivant montre l'état de charge de la batterie en un an

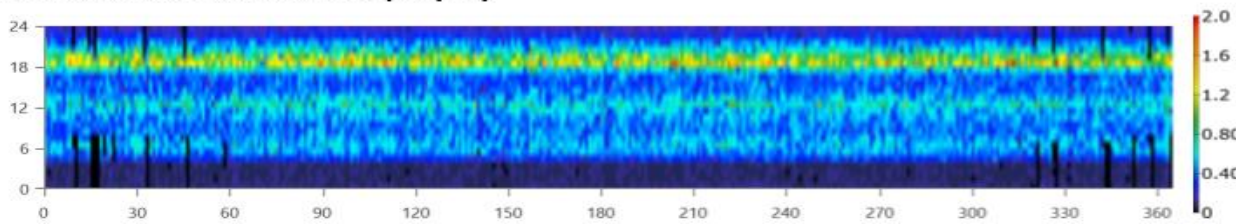
En ce qui suit Représente la sortie de l'onduleur en un an avec l'étude économique

Converter: Fronius Galvo 2.5-1**Fronius Galvo 2.5-1 Electrical Summary**

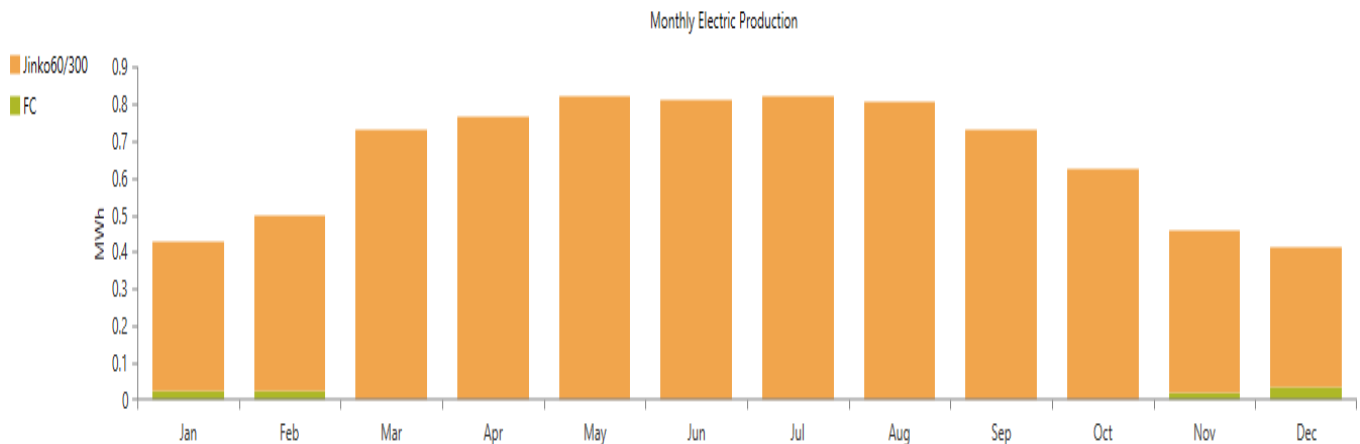
Quantity	Value	Units
Hours of Operation	8,751	hrs/yr
Energy Out	4,051	kWh/yr
Energy In	4,264	kWh/yr
Losses	213	kWh/yr

Fronius Galvo 2.5-1 Statistics

Quantity	Value	Units
Capacity	2.00	kW
Mean Output	0.462	kW
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	2.00	kW
Capacity Factor	23.1	%

Fronius Galvo 2.5-1 Inverter Output (kW)**Figure 36: la sortie de l'onduleur****IV.8.2 Performance de pile à combustible**

D'après la figure, La couleur vert indique la production d'électricité par le PAC et la couleur jaune indique la production d'électricité par les panneaux PV. La production d'énergie solaire est en grande quantité pour les mois Mai, Juin, Juillet et Août. Le potentiel solaire peut satisfaire la consommation dans ces périodes par le générateur photovoltaïque avec les systèmes de stockage

**Figure 37:La production d'énergie solaire**

On constate que la pile à combustible à une faible contribution est ce durant les mois de Janvier, février, Novembre, Juin et Décembre tandis que le reste d'année on utilise stockage des batteries. voir la figure.

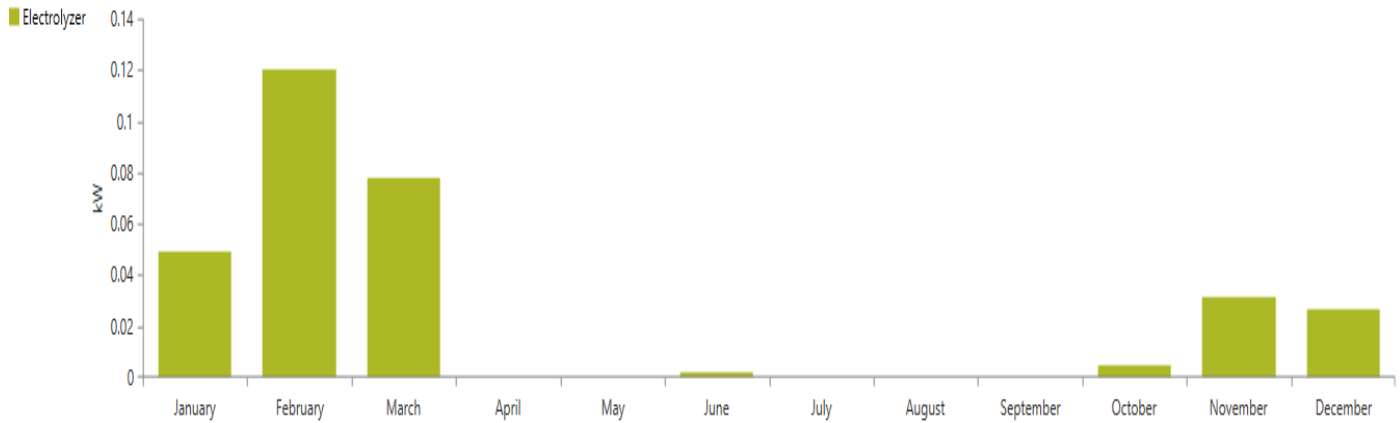


Figure 38: Production de l'hydrogène par un an

Le fonctionnement au cours d'une année complète de la pile à combustible est représenté dans la figure suivante.

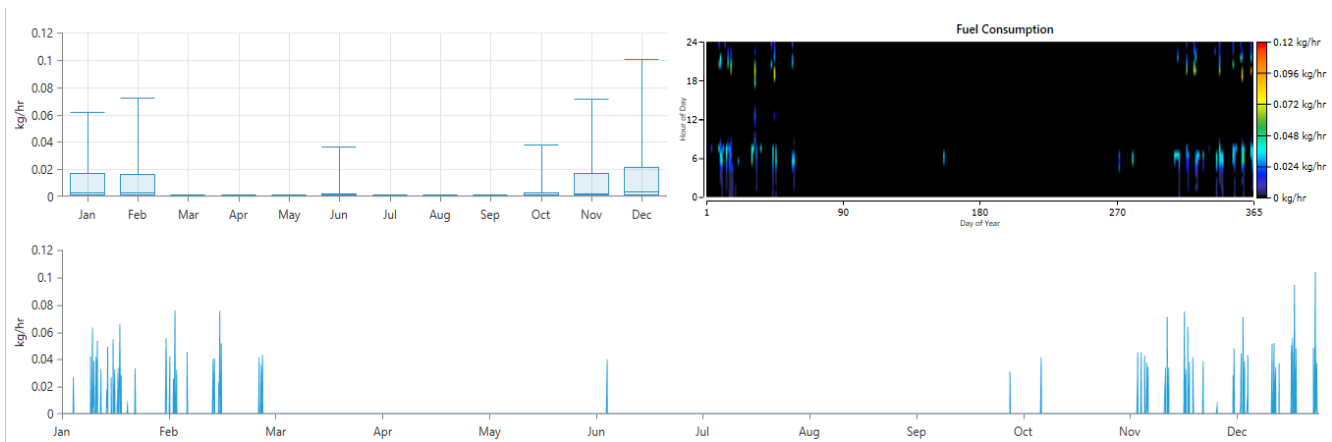


Figure 39: Le fonctionnement de la pile à combustible

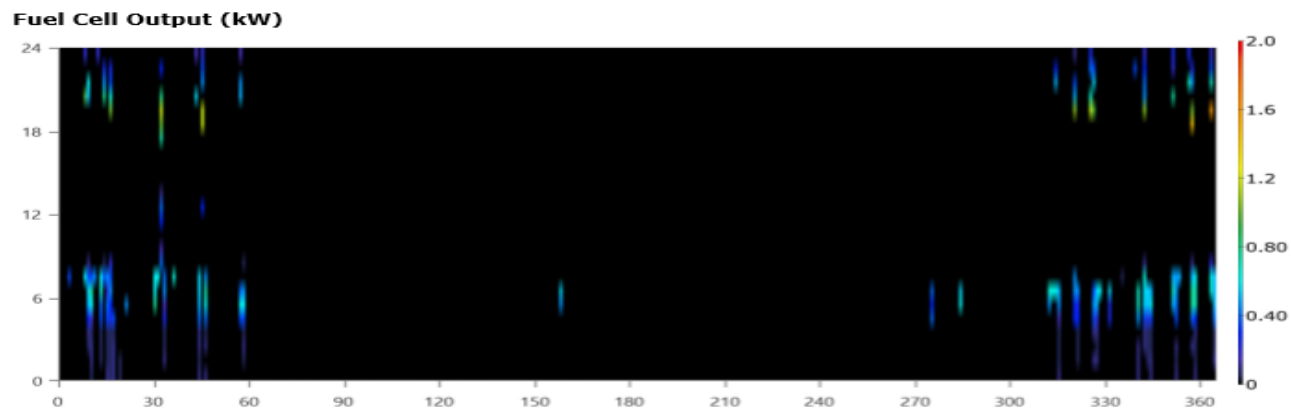
Dans le cas où la production du panneau photovoltaïque est faible, la pile à combustible va intervenir pour assure la production de puissance. Surtout, vu que c'est capable de fonctionner à n'importe quel moment de la journée d'une manière optimisée selon le besoin de la charge.

Les paramètres de fonctionnements sont donnés ci-dessous :

Fuel Cell Electrical Summary		
Quantity	Value	Units
Electrical Production	105	kWh/yr
Mean Electrical Output	0.385	kW
Minimum Electrical Output	0.000852	kW
Maximum Electrical Output	1.67	kW

Fuel Cell Fuel Summary		
Quantity	Value	Units
Fuel Consumption	6.28	kg
Specific Fuel Consumption	0.0600	kg/kWh
Fuel Energy Input	209	kWh/yr
Mean Electrical Efficiency	50.0	%

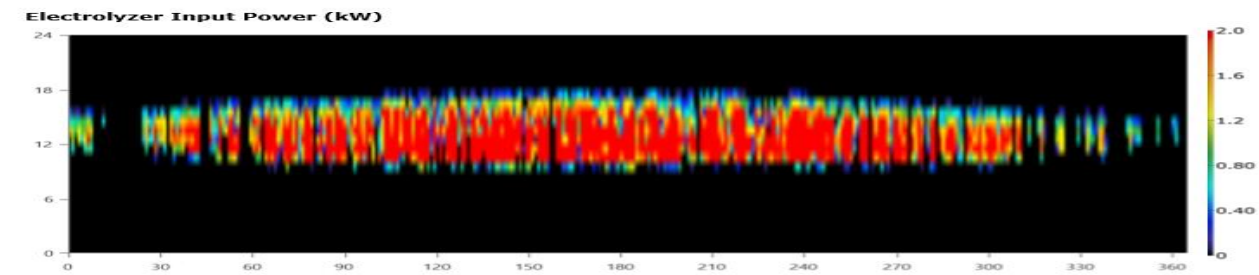
Fuel Cell Statistics		
Quantity	Value	Units
Hours of Operation	272	hrs/yr
Number of Starts	83.0	starts/yr
Operational Life	147	yr
Capacity Factor	0.597	%
Fixed Generation Cost	0.225	US\$/hr
Marginal Generation Cost	0	US\$/kWh



La figure suivante illustre les paramètres de fonctionnement de l'électrolyse

Table 17: Paramètres de fonctionnement de l'électrolyseur

Electrolyzer: Electrolyzer		
Summary		
Quantity	Value	Units
Mean output	0.00705	kg/hr
Minimum Output	0	kg/hr
Maximum Output	0.0431	kg/hr
Total production	61.8	kg/yr
Specific consumption	46.4	kWh/kg
Statistics		
Quantity	Value	Units
Rated capacity	2.00	kW
Mean input	0.327	kW
Minimum input	0	kW
Maximum input	2.00	kW
Total input energy	2.867	kWh/yr
Capacity Factor	16.4	%
Hours of operation	2,090	hr/yr



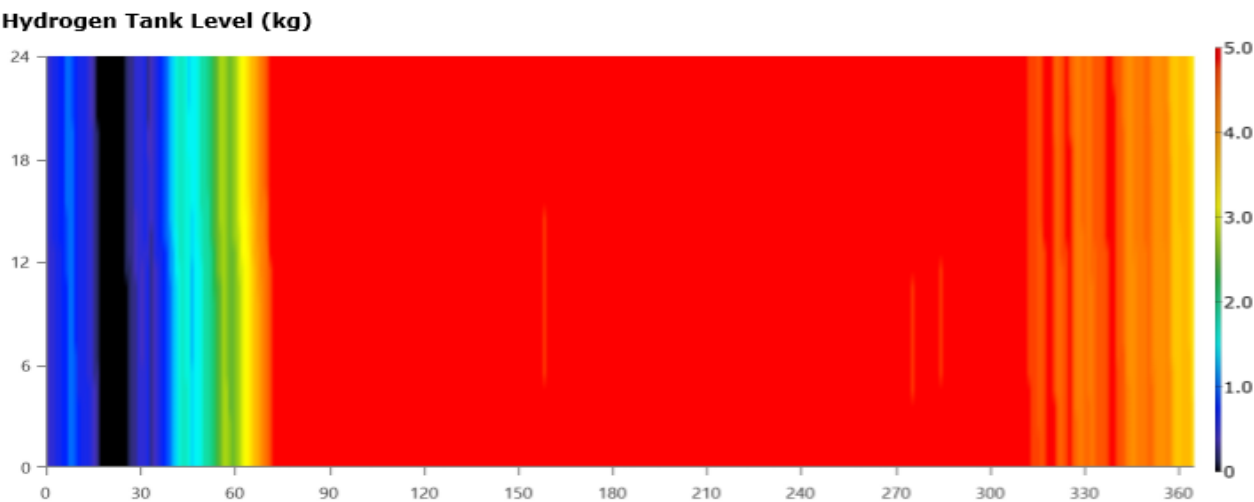
L’hydrogène ainsi produit par l’électrolyseur est stocké dans un réservoir sous pression pour être injecté dans la pile à combustible afin d’alimenter notre charge.

Table 18:les paramètres relie au réservoir de l’hydrogène

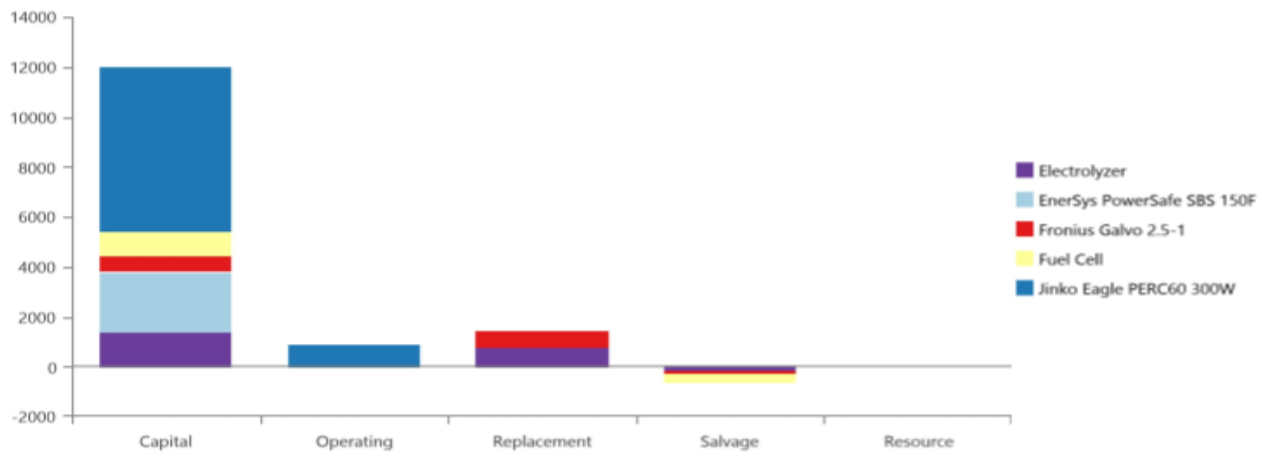
Hydrogen Tank: Hydrogen Tank

Properties		
Quantity	Value	Units
Hydrogen storage capacity	5.00	kg
Energy storage capacity	167	kWh
Tank autonomy	355	hr

Statistics		
Quantity	Value	Units
Content at beginning of year	0.500	kg
Content at end of year	3.49	kg



Les graphes ci-dessous illustres l’aspect économique global de notre système étudié :

Cost Summary**Net Present Costs**

Name	Capital	Operating	Replacement	Salvage	Resource	Total
Electrolyzer	US\$1,400	US\$0.00	US\$786.22	-US\$178.39	US\$0.00	US\$2,008
EnerSys PowerSafe SBS 150F	US\$2,400	US\$0.00	US\$0.00	US\$0.00	US\$0.00	US\$2,400
Fronius Galvo 2.5-1	US\$600.00	US\$0.00	US\$686.40	-US\$114.68	US\$0.00	US\$1,172
Fuel Cell	US\$1,000	US\$0.00	US\$0.00	-US\$372.70	US\$0.00	US\$627.30
Jinko Eagle PERC60 300W	US\$6,600	US\$945.14	US\$0.00	US\$0.00	US\$0.00	US\$7,545
System	US\$12,000	US\$945.14	US\$1,473	-US\$665.77	US\$0.00	US\$13,752

Annualized Costs

Name	Capital	Operating	Replacement	Salvage	Resource	Total
Electrolyzer	US\$88.88	US\$0.00	US\$49.91	-US\$11.32	US\$0.00	US\$127.46
EnerSys PowerSafe SBS 150F	US\$152.36	US\$0.00	US\$0.00	US\$0.00	US\$0.00	US\$152.36
Fronius Galvo 2.5-1	US\$38.09	US\$0.00	US\$43.57	-US\$7.28	US\$0.00	US\$74.38
Fuel Cell	US\$63.48	US\$0.00	US\$0.00	-US\$23.66	US\$0.00	US\$39.82
Jinko Eagle PERC60 300W	US\$418.98	US\$60.00	US\$0.00	US\$0.00	US\$0.00	US\$478.98
System	US\$761.79	US\$60.00	US\$93.49	-US\$42.26	US\$0.00	US\$873.01

Figure 40: Résultats des coûts détaillés des composants du système et les paramètres de fonctionnement

Figure 41: Résultats des coûts détaillés des composants du système et les paramètres de fonctionnement

Pour les émissions de CO₂ et de la cote environnementale, on peut dire que notre système de production d'énergie est propre et le plus respectueux de l'environnement. Le Tableau suivant présente les émissions annuelles du système électrique hybride.

Table 19: Emissions annuelles du système hybride

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	-0.0641	kg/yr
Carbon Monoxide	0.0408	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0.00452	kg/yr
Particulate Matter	0.00308	kg/yr
Sulfur Dioxide	0	kg/yr
Nitrogen Oxides	0.364	kg/yr

IV.9 Concluons

Dans ce chapitre on a présenté les résultats de l'étude par HOMER, d'une installation PV-PAC et PV-Batterie. Nous avons déterminé lors de l'étude de faisabilité technico-économique et environnementale visant à trouver la configuration optimale de notre système de source renouvelable solaire photovoltaïque et pour répondre à la demande de faire une combinaison de deux systèmes de stockage afin de maintenir l'alimentation de charge durant toutes les saisons d'année.



Conclusion Générale



Conclusion Générale

Dans ce travail rentrant dans le cadre du mémoire de master (option Energies renouvelables), nous avons considéré une étude d'un système solaire photovoltaïque basé sur la production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau et la production d'électricité, avec l'utilisation des données climatiques de la région de Nouakchott en Mauritanie. Le stockage d'énergie via l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau associé aux sources d'énergie renouvelables répond bien à la problématique posée par le contexte énergétique actuel : comment résoudre le problème d'intermittence ?, Le problème auquel nous sommes confrontés à cet égard est la rationalisation et l'exploitation optimale de l'électricité en exploitant le surplus d'électricité et en le stockant sous forme d'hydrogène, car c'est l'un des problèmes les plus importants en matière de gestion de l'électricité.

Dans cette étude, nous avons présenté la modélisation de tous les éléments constituant le système de production d'hydrogène solaire tels que le panneau photovoltaïque, l'électrolyseur et la pile à combustible...et etc. Le système étudié est autonome, comprenant principalement une charge (l'utilisateur final), un système de stockage d'énergie et un champ photovoltaïque. Trois types de système de stockage d'énergie ont été évalués :

- ❖ Stockage par les batteries ;
- ❖ Pile à combustible alimentée par l'USEH (Unité de Stockage d'Energie via l'Hydrogène produite par l'électrolyseur) ;
- ❖ Un système de stockage hybride PAC / batteries.

Notre travail de simulation sur le logiciel HOMER (qui détermine seulement les systèmes les plus faisables et rentables économiquement. Or, il peut en juste proportion servir la charge électrique demandée) nous a permis d'obtenir comme résultat de cette étude sur notre système autonome de stockage hybride :

- ✓ Un coût initial de projet 18900 US\$ /
- ✓ le coût total net du système 21564 US\$
- ✓ le coût production électrique 0.334 US\$/KWh

Les inconvénients de l'installation PV-PC-Batterie autonome est son coût élevé. Mais Les faibles émissions des gaz à effet de serre est l'avantage le plus important de notre installation.

Références Bibliographiques

- [1]-MOSSERI, Catherine (dir.). « L'énergie à découvert, ». Edition Cnrs, Paris, 2013.
- [2]-R. Benchrif, A. Bennouna et D. Zejli «Rôle de l'hydrogène dans le stockage de l'électricité à base des énergies renouvelables, » Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique Unité technologies économies des énergies renouvelables BP. 8027, Agdal Rabat, Maroc Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda (2007) 103 – 108.
- [3]-La complexité du réseau et l'électricité verte : <http://www.mediachimie.org/node/1323>
- [4]-L'hydrogène vert au secours des renouvelables : <http://www.mediachimie.org/node/1721>
- [5]-S. Bousquet, D. Mayer, R. Metkemeijer, "Development of a clean stand-alone power system integrating PV, fuel cell and electrolyser" Proceedings of the Photovoltaic Hybrid Power Systems conference, Aix en Provence, 7-9 September, Session I, Oral n°5, 2000.
- [6]-KIRATI Sid Ahmed Khodja «contribution à l'étude de la qualité d'hydrogène produit par une source d'énergie renouvelable et hybride, » Thèse De Doctorat A L'université des sciences et des technologies Houari Boumediene, faculté de physique, Alger, 2018.
- [7]-Aminetou CHEIKH MOHAMEDOU «Principe fonctionnement des centrales solaires photovoltaïques de Nouakchott couplées au réseau, Opérations et Maintenance, Recherche de solution à la limitation de puissance de la centrale de Toujounine, » mémoire de master en Matériaux Avancés et Energie, Energie renouvelable, Université de CERGY PARIS Département de Physique. Promotion 2019-2020.
- [8]-Centrales photovoltaïques-Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets, PACER
- [9]-Global Wind Energy Council, "Global wind statistics 2015," 10 Février 2016.
- [10]-Chikha Said «Contribution à l'optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaines de conversion d'énergie éolienne, » Thèse De Doctorat A L'université de Larbi Ben M'hidi, Faculté des sciences et des sciences appliquées Département de génie électrique, Oum El Bouaghi.2017.
- [11]-Mekki Mounira «Récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable, » thèse de doctorat, Algérie, 2014, page 15.
- [12]-Gasmi Nesrine «Les ressources en énergies renouvelables, » Mémoire de fin d'étude, Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –Bordj Bou, 2021.

Références Bibliographiques

- [13]-Jacques BERNARD, « Energie solaire Calculs et optimisation, » Edition Ellipses, Paris, 2004.
- [14]-A.Labouret, M.Villoz, « Energie Solaire Photovoltaïque », Edition Dunod, Paris, 2006
- [15]-O. Gergaud « Modélisation Energétique Et Optimisation Economique D'un Système De Production Eolien Et Photovoltaïque Couplé Au Réseau Et Associé A Un Accumulateur, » Thèse De Doctorat, Ecole Normale Supérieure De Cachan, Décembre 2002.
- [16]-International Energy Agency (IEA) ,07/05/ 2021, à 9:12.
- [17]-Jacques Roy, Marie Demers,« La filière de l'hydrogène : un avantage stratégique pour le Québec, » Rapport décembre 2019.
- [18]**-EA (Commissariat à l'Energie Atomique), « Le soleil – de l'étoile à l'énergie domestique- », ISSN 1637-5408, 2004.
- [19]-Jean-Louis DURVILLE, Jean-Claude GAZEAU, Jean-Michel NATAF, Jean CUEUGNIET, Benoît LEGAIT «Filière hydrogène-énergie, » Rapport à Madame la ministre de l'Écologie, du développement durable et de l'Énergie et Monsieur le ministre de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique, Juillet 2015.
- [20]- KORBAA Fatima «Etude de l'influence de la température d'hydrogène sur la tension de la pile à combustible (PAC), » Mémoire de fin d'étude, Université Mohamed El Bachir L'Ibrahim –Bordj Bou Arreridj, 2019.
- [21]-P. Chaiprasert, T. Vitidsant (2009) Promotion of Coconut Shell Gasification by Steam Reforming on Nickel-Dolomite. J ChemEng, Vol 26, 545-549
- [22]**-VISEUR, Mathieu «Etude de faisabilité de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur alternatif d'énergie, » mémoire de master en Sciences et Gestion de l'Environnement, Institut de Gestion de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire, Faculté des Sciences. Université Libre de Bruxelles, Promotion 2007 – 2008.
- [23]-Valérie DE DIANOUS, Sylvaine PIQUE, Benno WEINBERGER., «Etude comparative des réglementations, guides et normes concernant les électrolyseurs et le stockage d'hydrogène, » Rapport d'étude Mars 2016.
- [24]-Florence LEFEBVRE-JOUD, Laurent BRIOTTET, Olivier GILLIA, Fabien NONY
, «Matériaux de la filière hydrogène - Stockage et transport, » Editions T.I. 10 avril 2010.

Références Bibliographiques

- [25]-GAT 4, «PRODUCTION ET STOCKAGE DE L'HYDROGENE», Rapport juillet 2004.
- [26]-Journée du CUEPE 2005 « L'hydrogène, futur vecteur énergétique ? », Genève le 13 mai 2005
- [27]-Le stockage de l'hydrogène <https://www.ecosources.org/stockage-hydrogene>
- [28]-Thierry Priem, Christine Mansilla, Sylvie Aniel-Buchheit, Alain Le Duigou, François Le Naour, Jean-Guy Devezeaux de Lavergne, «Les systèmes hydrogène : quels usages avec quelles technologies ?, » La Revue de l'Énergie n° 639 – juillet-août 2018
- [29]-Le gaz vert, une énergie renouvelable d'avenir <https://www.afgaz.fr/hydrogene/>
- [30]-FAHAD Maoulida, KASSIM Mohamed Aboudou , << Modélisation d'un module photovoltaïque de type bp sx 150 pour la génération d'énergie électrique, >> Faculté des Sciences et Technologies, Université d'Antananarivo, Madagascar , Laboratoire d'Energie et Mécanique Appliquée, LEMA, département de Math-Physique, Faculté des Sciences et Techniques, Université des Comores, Moroni, Comores .LERMAB, Institut Universitaire de Technologie, IUT Henri Poincaré, 54 400 Longwy Cedex, Université de Lorraine, France.
- [31]- BP Solar BP SX150-150W Multi-crystalline photovoltaic Module Data sheet
- [32]-Walker, Geoff R. « Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV Model », Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC '00, Brisbane, 2000.
- [33] -ARAB Lydia, CHEBBI «étude et simulation d'une pile à combustible de type PEM, » Mémoire de fin d'étude, Université Akli mohand oulhandj de bouira, 2016.
- [34]-Benmessaoud Mohamed Tarik « Système d'énergie hybride PV-SOFC Étude de cas de réalisation stationnaire à l'USTO, » Thèse De Doctorat, Université des sciences et de la technologies—Mohamed Boudiaf-Oran, Juillet 20012.
- [35]-Ulleberg O, « Stand alone power systems for the future: optimal design, operation and control of solar-hydrogen energy systems», Ph-D. dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, December 1998
- [36] <https://www.homerenergy.com/>
- [37]-A.S. Aziz, and S.A. Khudhier, 'Optimal Planning and Design of an Environmentally Friendly Hybrid Energy System for Rural Electrification in Iraq', American Journal of Applied Sciences Vol. 14, N°1, pp. 157 - 165, 2017. Doi: 10.3844/ajassp.2017.157.165
- [38]- Mauritanie: Plan directeur de production et transport de l'énergie électrique en Mauritanie entre 2011 et 2030 - Rapport final
- [39]- Himadry Shekhar Das, Chee Wei Tan, A.H.M. Yatim, Kwan Yiew Lau «Feasibility analysis of hybrid photovoltaic/battery/fuel cell energy system for an indigenous residence in East Malaysia», 2017