

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université KASDI Merbah Ouargla

_____ooOoo_____

Faculté des mathématiques et sciences de la matière

_____ooOoo_____



Mémoire

Présenté pour l'obtention du Diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Filière : Physique

Spécialité : Energétique et énergies renouvelables

Thème :

**Modélisation et simulation d'un système hybride de
stockage énergétique dans un réseau autonome**

Présenté et soutenu publiquement par :

Ben azzouz Afak et Bougoffa Nourelhouda

Soutenu le :23 /09 /2020

Devant le Jury

MCA. MOHCEM Hocine

Univ KMO

Président

MCA.Negrou Belkhir

Univ KMO

Examineur

Pr SETTOU Noureddine

Univ KMO

Encadreur

Année Universitaire : 2019 /2020

Remerciements

Avant tout, nous remercions **ALLAH**, le Tout Puissant, de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nos vifs remerciements vont d'abord à notre encadreur, le professeur **SETTOU Noureddine**, pour son suivi, son soutien et conseils judicieux tout au long de ce mémoire.

Nous remercions infiniment M. **MOHCEM Hocine**, de l'université Kasdi Merbah Ouargla Faculté des mathématiques et sciences de la matière, d'avoir fait l'honneur de présider notre jury de mémoire.

Nos meilleurs remerciements vont au docteur **Negrrou Belkhir**, de l'université Kasdi Merbah Ouargla Faculté des mathématiques et sciences de la matière, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nos sincères reconnaissances à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à réaliser ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail qui est le résultat de longues années d'étude :

*A mes parents (**Ahmed et Khanfer Souad**), à qui je dois le plus Grand respect, et pour leur amour inestimable Leur confiance, Leur soutien, Leur sacrifice Et toutes les valeurs, Qu'ils ont su m'inculquer, et qui ils représentent, pour moi l'exemple de sacrifice.*

Et je dis merci :

*Ma sœur (**Khawla**) ainsi qu'à mes beaux-frères (**Ramzi, Amdjed, Sido et Ta9i**) pour leur amour et leur soutien pour moi, et les filles de ma sœur (**Sidra el-Muntaha et Kawthar**).*

*À notre encadreur, le doctorant, **SETTOU Belkhir**, qui m'a donné le courage et la volonté de mener à bien mes recherches scientifiques à toute ma famille, sans exception, à tous mes amis spéciaux, ainsi qu'à tous Ceux qui ont contribué.*

De près ou de loin dans mes encouragements et mon soutien ,a tous mes professeurs, chacun avec son propre nom, en particulier le

Département de physique.

Merci et tout l'amour, le respect et l'appréciation.

Bougoffa Nourelhouda

Dédicaces

Je dédie ce travail

A tous les membres de ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui :

Particulièrement à mon père (Belkhem), pour son soutien, son affection et la confiance qu'il m'a accordé.

A ma mère (BenSmaïl Hafida) pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices.

A mon frères Fares et ma sœurs Nihade qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.

A notre doctorant SETTOU Belkhir pour tous les efforts et l'affection qu'il m'a donnée et pour son précieux encouragement.

A tous mes amis

Et tous ceux qui m'aiment

Je vous remercie tous

Ben Azouz Afak

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre 1 : Système hybride et stockage énergie: Etat des lieux

<i>1.1</i>	<i>Introduction</i>	<i>4</i>
<i>1.2</i>	<i>Les moyens de production d'électricité.....</i>	<i>4</i>
<i>1.3</i>	<i>Quel avenir pour les combustibles fossils ?.....</i>	<i>5</i>
1.3.1	Turbine à gaz.....	6
1.3.2	Turbine à vapeur	6
1.3.3	Turbines à cycle combine	7
1.3.4	Les énergies renouvelables	7
1.3.5	Géothermique.....	8
1.3.6	L'énergie hydraulique	8
1.3.7	Energies solaire.....	8
<i>1.4</i>	<i>Qu'est-ce qu'un système hybride d'énergie ?</i>	<i>10</i>
1.4.1	Etudes des structures de systèmes hybrides.....	10
<i>1.5</i>	<i>Systèmes de Stockage d'énergie (SSE).....</i>	<i>10</i>
1.5.1	Dispositifs de stockage de l'énergie	11
<i>1.6</i>	<i>Comparaison entre les modes de stockage</i>	<i>12</i>
<i>1.7</i>	<i>Contexte énergétique et environnemental Algérien.....</i>	<i>14</i>
1.7.1	Production d'électricité	14
1.7.2	Potentiel national des énergies renouvelables.....	16
1.7.2.3	Potentiels d'hydrogène solaire	17

1.8 Conclusion	18
chapiter 2: Description d'un système hybride de à bas d'hydrogène	
2.1 Introduction	20
2.2 Système hybride à base hydrogène.....	20
2.2.1 Système hybride : photovoltaïque.....	21
2.2.2 Le réseau électrique	22
2.2.3 Mécanisme de distribution d'énergie électrique :	22
2.3 Généralité sur les technologies de Photovoltaïques :.....	24
2.3.1 Les modèle des photovoltaïques	24
2.3.2 La distribution des cellules électrique.....	25
2.4 Etude sur généralité de production hydrogène.....	27
2.4.1 Modes de production de l'hydrogène	27
2.5 L'électrolyseur.....	27
2.5.1 Les types d'électrolyseur	28
2.6 Bilan sur hydrogène pour l'énergie	31
2.7 Comparaison des méthodes de stockage d'hydrogène	32
2.8 La pile à combustible	33
2.9 Conclusion.....	36
Chapitre 03: Modélisation d'un système hybride de stockage d'hydrogène	
3.1 Introduction	38
3.2 Présentation du cas d'étude	38
3.1 Modèle de profil de charge électrique	40
3.3 Caractérisation technique des sous-systèmes	41
3.4 Modélisation du système hybride	43
3.4.1 Modélisation de photovoltaïque.....	43
3.4.2 Modélisation de l'électrolyseur.....	45
3.4.3 Modélisation du compresseur	46

3.4.4	Modélisation de la pile à combustible	48
3.5	<i>Algorithme de processus du calcul (gestion d'énergie)</i>	49
3.6	<i>Conclusion</i>	50

Chapitre 04:Résultats et discussions

4.1	<i>Introduction</i>	52
4.1	<i>Résultats et discussions</i>	52
4.2	<i>Production et stockage d'hydrogène (fonctionnement de l'électrolyseur)</i>	55
4.2.1	Production et stockage d'hydrogène (fonctionnement de l'électrolyseur) pendant le mois de décembre	59
5	67
6	68
7	<i>Modélisation et simulation d'un système hybride de stockage énergétique dans un réseau autonome</i>	68

Conclusion

Liste des abréviations

AC	Courant Alternatif (Alternative Current)
AIE	Agence Internationale de l'Energie
An	Anode
AWE	Electrolyse alcaline de l'eau
BP	British Petroleum
C.C	Cycle Combiné
Ca	Cathode
CREG	Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz
DC	Courant Continu (Direct Current)
EnR	Energie renouvelable
FC	Fuel Cell
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
GRD	Gestionnaire de Réseau de Distribution
GRTE	Gestionnaire de Réseau Transport d'Electricité
MEA	Membranes Alcalines Échangeuses d'anions
OPEP	Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole

PAC	Piles à Combustible
PEM	Membrane échangeuse de Protons (Proton Exchange Membrane)
PIB	Produit Intérieur Brut
PNER	Programme National des Energies Renouvelables
PV	Photovoltaïque
SSE	Systèmes de Stockage d'énergie
SHER	Système hybride énergie renouvelable
SKB	Shariket Kahraba Berrouaghia
SKD	Shariket Kahraba Koudiet Edraouch
SKH	Shariket Kahraba HadjretEnnouss
SKS	Shariket Kahraba Skikda
SKT	Shariket Kahraba Terga
SKTM	Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida
SOE	Electrolyse de l'eau à oxyde solide
Sonatrach	Société nationale de transport et de commercialisation des hydrocarbures
Sonelgaz	Société Nationale de l'Electricité et du Gaz
SPE	Société de Production de l'Électricité
tep	tonne équivalent pétrole

TG Turbine à Gaz

Tc La température du cellule

Tamb la température ambiante

Liste des Figures

Chapitre01 : Système hydride et stockage énergie: Etat des lieux

Figure 1.1	les différents types de production électrique	05
Figure 1.2	Schéma d'une turbine à gaz composée d'un corps HP et d'un cor	06
Figure 1.3	fonctionnement d'une centrale à cycle combiné gaz	07
Figure 1.4	Technologie de la tour solaire	09
Figure 1.6	les différentes formes de stockage énergétique	12
Figure 1.7	Répartition des SSE par puissance/temps de réponse	13
Figure 1.8	Applications du stockage d'énergie : équilibre offre- Demande	14
Figure 1.9	Evolution de la puissance installée par type d'équipement (en MW) sur la période	15
Figure1.10	Evolution de la production d'électricité par type d'équipement (en MWh) sur la période	16
Figure1.11	Potentiel hydrogène d'énergie solaire	17

Chapitre 02: Description d'un système hybride de à bas d'hydrogène

Figure 2.1	Système hybride de stockage d'énergie à base d'hydrogène dans un réseau autonome	22
Figure 2.2	Structure de SHER à bus à (courant continu, courant alternatif, continu et alternatif)	23
Figure 2.3	Réseau de distribution d'électricité	25
Figure 2.4	fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	26

Figure 2.5	système PV avec câblage série et parallèle	27
Figure 2.6	système PV avec hacheur série	28
Figure 2.7	principe méthodes de la production d'hydrogéné	29
Figure 2.8	principe du travail d'électrolyse généralement	30
Figure 2.9	Schéma d'une cellule d'électrolyse PEM	33
Figure2.10	Panel des applications potentielles de l'hydrogène, d'après l'AFHC	35
Figure2.11	Pile à Combustible	37
Figure2.12	Structure d'un empilement de cellule PEMF	39

Chapitre 03: Description d'un système hybride de à bas d'hydrogène

Figure 3.1	Localisation géographies de la zone d'étude daïra N'goussa	43
Figure 3.2	valeurs de rayonnement solaire et durée d'ensoleillement pour la région de N'goussa	43
Figure 3.3	les profile de charge électrique (KWh) liée à la consommation horaire de l'électricité Pour les deux mois (juillet, décembre)	44
Figure3.4	La valeur de courant (A) et tension (V) du module PV	43
Figure 3.5	résume la modélisation du compresseur	51
Figure 3.6	Organigramme du système hybride (réseau, photovoltaïque) à base hydrogène.	53

Chapitre 04:Résultats et discussions

Figure 4.1	cas d'étude juillet ...(a): Evaluation de la production horaire de l'électricité photovoltaïque ...(b): Comparaison entre température ambiante (Temp) et température de cellule du PV	57
Figure 4.2	Evolution de la production totale et la consommation de l'électricité dans le mois Juillet	57

Figure 4.3	Evolution des périodes de production d'hydrogène et d'électricité dans le mois de Juillet	58
Figure 4.4	la variation temporelle de la production d'hydrogène à la sortie de l'électrolyseur pendant le mois juillet [N m ³ /h].	59
Figure 4.5	Evolution du fonctionnement du compresseur	60
Figure 4.6	cas d'étude Décembre (a) : Evaluation de la production horaire de l'électricité photovoltaïque ... (b) : Comparaison entre température ambiante (Temp) et température de cellule du PV	61
Figure 4.7	Evolution de la production totale et la consommation de l'électricité dans le mois décembre	61
Figure4.8	Evolution des périodes de production d'hydrogène et d'électricité dans le mois de décembre	63
Figure 4.9	la variation temporelle de la production d'hydrogène à la sortie de l'électrolyseur pendant les mois de décembre [N m ³ /h].	64
Figure4.10	Evolution du fonctionnement du compresseur (décembre)	65

Liste des Tableaux

Chapitre01 : Système hybride et stockage énergie: Etat des lieux

Table1.2	Potentiel Solaire en Algérie	18
----------	------------------------------	----

Chapitre 02: Description d'un système hybride de à bas d'hydrogène

Table2.1	Le different type d'électrolyseur	31
Table2.2	Propriétés des différents moyens de stockage de l'hydrogène	35
Table2.3	Différents types des piles à combustible	38

Chapitre 03: Description d'un système hybride de à bas d'hydrogène

Table3.1	<i>Spécifications du module PV « TSM-PD 265W»</i>	46
Table3.2	Spécifications techniques de l'électrolyseur PEM	46
Table3.3	Spécifications techniques de pile à combustible PEM	47

Introduction générale

Introduction générale

Tout le monde en parle un sujet politique important pour de nombreuses raisons. Le concept de transition énergétique est apparu en 1980, en Allemagne et en Autriche, sous la forme d'un livre blanc, suivi à Berlin du premier congrès sur le sujet. La transition énergétique désigne l'ensemble des transformations du système de production, de distribution et de consommation d'énergie effectuées sur un territoire dans le but de le rendre plus écologique. Concrètement, la transition énergétique vise à transformer un système énergétique pour diminuer son impact environnemental. Elle est en cela partie prenante des stratégies de développement durable et de lutte contre le réchauffement climatique [1].

Le passage d'un modèle énergétique, et d'un mode de consommation de l'énergie plus rationnel qui consomme moins d'énergie fossile et plus d'énergies renouvelables (les EnR).

La consommation d'énergie est en croissance constante, contrairement à la production. A tous les niveaux des responsables du pays et en particulier à l'Agence Nationale de Maîtrise de l'énergie, une conscience accrue des problématiques énergétiques nationale et internationale se développe. La création du poste de responsable énergie montre que le domaine de l'énergie est vraiment devenu crucial. Pour les entreprises industrielles, la consommation de l'énergie peut être réduite sans pour autant réduire la production. L'économie d'énergie dans une entreprise contribue aussi à sa compétitivité. La forte demande actuelle de consommation énergétique en Algérie est due principalement à l'augmentation du niveau de vie de la population et du confort qui en découle, ainsi qu'à la croissance des activités industrielles. elle nous interpelle sur la nécessité d'une nouvelle politique énergétique ainsi que de nouveaux comportements des usagers[2].

La plupart des activités, mentionnées ci-dessus, requiert de l'énergie à des degrés divers. Cette énergie est soit consommée directement par les utilisateurs ou est nécessaire pour la production des biens et services associés à ces activités. Ainsi, la disponibilité d'énergie est une pré-obligation pour le développement socio- économique et industriel d'un pays [3].

Aujourd'hui 42 million de personnes et au cours des 30 prochaines années, nous serons environ 60 million de personnes, cette croissance va augmenter la consommation d'énergie.

Le sujet de ce travail est de mettre en évidence les méthodes de système hybride et le stockage de la nouvelle électricité utilisant de l'hydrogène. Un système hybride (réseau électrique, photovoltaïque) basée sur l'hydrogène est proposé comme solution à la fois non polluante et renouvelable.

Notre travail porte sur l'étude de technologie de photovoltaïque a basé de combustible l'hydrogène. Une analyse de la situation énergétique mondiale y est présentée. La production d'hydrogène a partie d'un système hybride, ainsi que la méthode de son stockage. L'analyse des perspectives du système de stockage d'hydrogène dans un réseau autonome montre que sa viabilité.

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. Il ne peut pas être stocké. Cette solution proposée est le système hybride dans un réseau autonome, il est maintenant une révolution dans le domaine du développement durable. Cet hydrogène peut être exploité dans plusieurs secteurs, tels que le secteur du logement et le secteur des transports.

Ce travail se développe en quatre chapitres et se termine par une conclusion:

Le premier chapitre presentie tous les moyen de production de l'électricité, la comparaisent enter l'énergie fossile et renouvelable, la définition d'un system hybride en généralement par a pour les outre réseaux, Ensuit Dispositifs de stockage de l'énergie dans la mesure où la consommation et la production sont fortement découplées et dimensionné. Ce chapitre présente les potentiels du pays d'énergies renouvelable et l'exploitation de l'Algérie dans ce secteur.

Le deuxième chapitre intitulé description du système hybride de stockage d'énergie à base d'hydrogène a été consacré à une présentation générale de la production d'électricité à partir en exploitant le surplus dans un réseau électrique indépendant et utilisé le technologies de Photovoltaïques en le stockant sous forme d'hydrogène, en vue de le réutiliser ultérieurement et de la filière hydrogène (production, stockage et conversion pour des fins énergétiques), l'utilisation de l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie est, de l'avis de nombreux experts, susceptible d'ouvrir de larges perspectives dans le monde de l'énergie. La pile à combustible, qui produit de l'électricité en étant alimentée par un combustible comme l'hydrogène, est à la base de ces techniques d'avenir.

La troisième chapitre intitulé modélisation d'un système de hybride de stockage à base d'hydrogène présentera l'analyse et le traitement d'une étude sur la production d'électricité

à partir d'un système hybride (réseaux électrique et PV) de stockage d'énergie à base d'hydrogène dans un réseau autonome,

Le dernier chapitre intitulé les résultats et les discussions de system hybride en utilisation de l'application de Matlab.

Chapitre 01 :
Systeme hydride et stockage
énergie: Etat des lieux

1.1 Introduction

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer il aura fallu la produire, en général dans des unités de production de grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur. Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour les plus répandus, permet d'avoir des coûts de production faibles mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant. Comme les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires. Aujourd'hui, après l'hydraulique, le grand éolien devient compétitif en termes de coûts de production [4].

Dans ce chapitre nous allons présenter tous les différents types de production électricité et stockage énergétique. Après cela, il était connu le système hybride avec mentionné les études de ce système et se termine par le contexte de production énergie dans l'Algérien.

1.2 Les moyens de production d'électricité

Il a fallu des siècles aux inventeurs pour comprendre comment produire de l'électricité. Ils ont fait plein d'expériences et ont appris à transformations des différentes sources d'énergie de la nature. La vie a alors beaucoup changé : éclairage, chauffage, cuisson, on pouvait faire des choses si incroyables grâce à elle qu'on l'a appelée la Fée électricité. Il en existe plusieurs qui fonctionnent tous à partir du déplacement des électrons. La seule différence c'est l'énergie utilisée renouvelable ou non [5]. À partir d'énergies fossiles qui est tirée par les trois principales : charbon, pétrole et gaz naturel. Elles sont appelées fossiles car elles proviennent de la décomposition très lente d'éléments vivants (surtout des plantes) il y a plusieurs millions d'années.

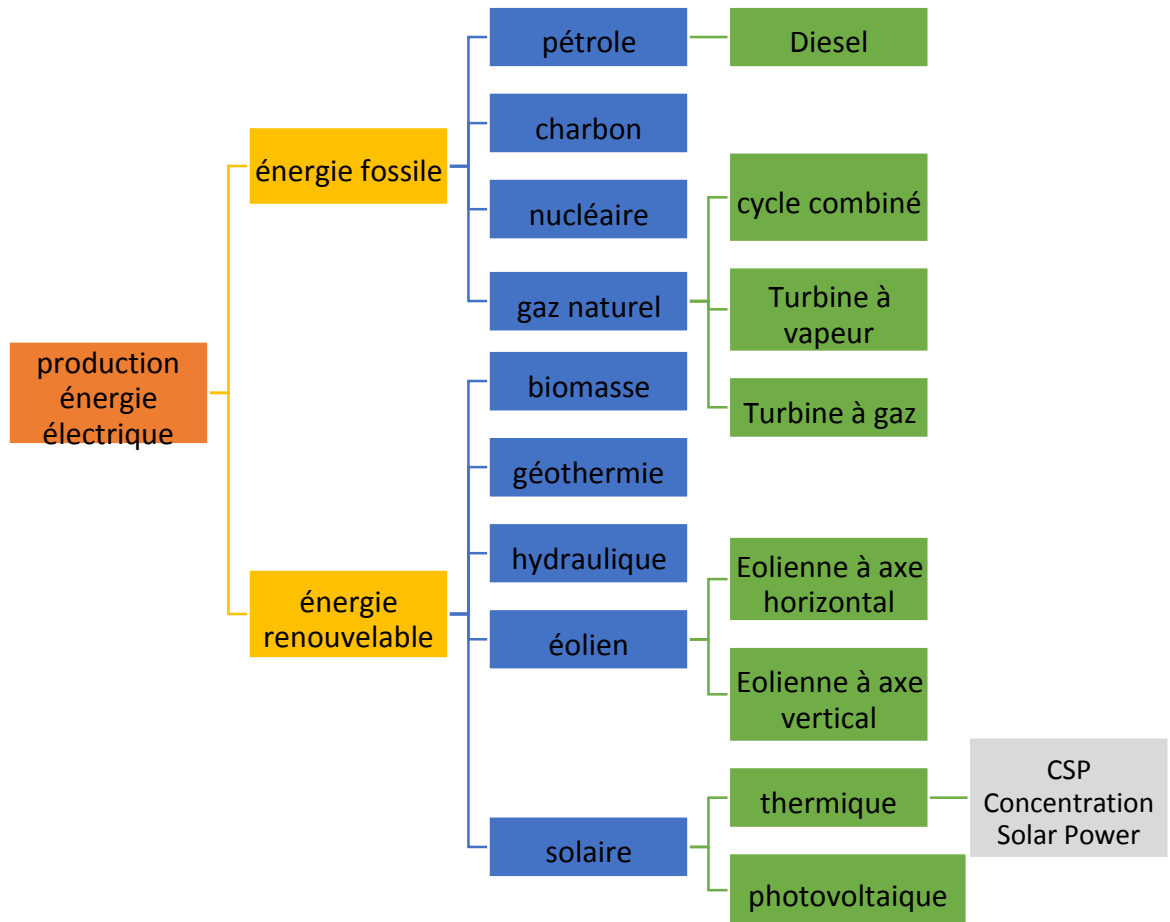


Figure 1.1 : les différentes types de production électrique [5], [6], [15]–[18], [7]–[14]

1.3 Quel avenir pour les combustibles fossiles ?

La demande mondiale d'énergie primaire demeure en forte croissance et elle a peu de chances de diminuer, à moyen terme, compte tenu du développement souhaitable et nécessaire des pays les moins riches. Les deux demandes les plus sensibles concernent l'électricité dans les mégapoles et les carburants pour les transports. Actuellement, les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon) fournissent 90% de l'énergie primaire, tandis que les hydrocarbures (pétrole) et (gaz) sont considérés comme les énergies de bouclage, permettant de répondre à tout niveau de demande [6]. Le gaz naturel est principalement constitué de méthane, Il est utilisé comme source d'énergie

ainsi que comme matière première par l'industrie[19]. Il existe trois technologies pour produire l'électricité.

1.3.1 Turbine à gaz

La turbine à gaz est une machine productrice d'énergie où l'énergie thermique et de pression sera transformée en énergie cinétique puis en énergie mécanique. Le travail et la puissance fournie à l'arbre sont fonctions des propriétés thermodynamiques de fluide et de la machine elle-même[17]. Elle est répartit en deux classes : d'une part, les turbomoteurs fournissant de l'énergie mécanique disponible sur un arbre et, d'autre part, les turboréacteurs fournissant de l'énergie cinétique utilisable pour la propulsion[12]

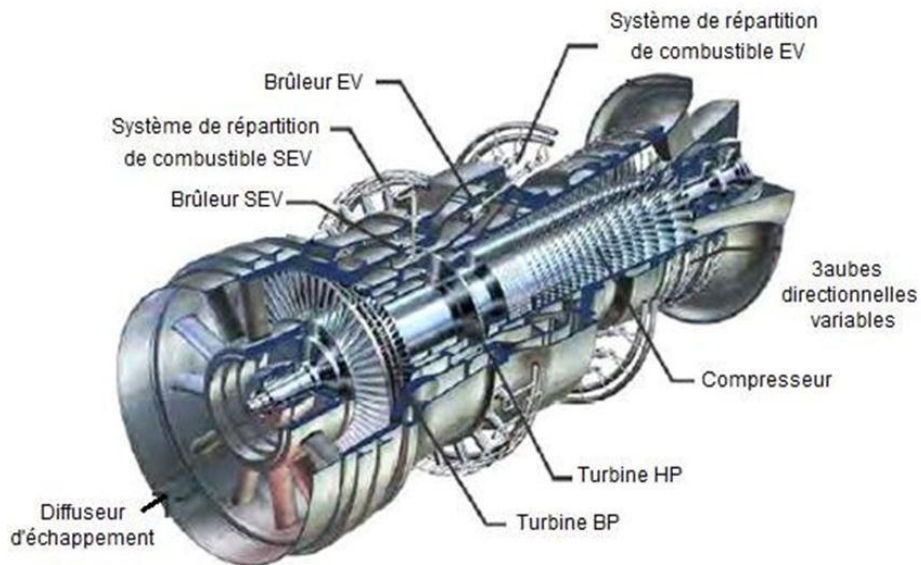


Figure 1.2 : Schéma d'une turbine à gaz composée d'un corps HP et d'un corps BP

1.3.2 Turbine à vapeur

Les turbines à vapeur employées dans les installations de cycle combiné ne sont pas différentes de celles qui équipent les autres installations de production d'énergie [17]elle est l'organe qui transforme l'énergie thermodynamique de la vapeur en énergie m mécanique de rotation. Elle est composée d'au moins deux corps : le corps haut pression (HP), qui reçoit la vapeur en sortie du générateur de vapeur et dont la pression en' passe d'environ 70 bar, a 10 bar

et le corps basse-pression (BP), qui succède au corps HP et dont la pression de vapeur diminue jusqu'` a environ 30-80 mbar[11].

1.3.3 Turbines à cycle combine

La technologie CC constitue un excellent moyen de production de l'électricité et est amenée à jouer un rôle important dans les années futures[17].

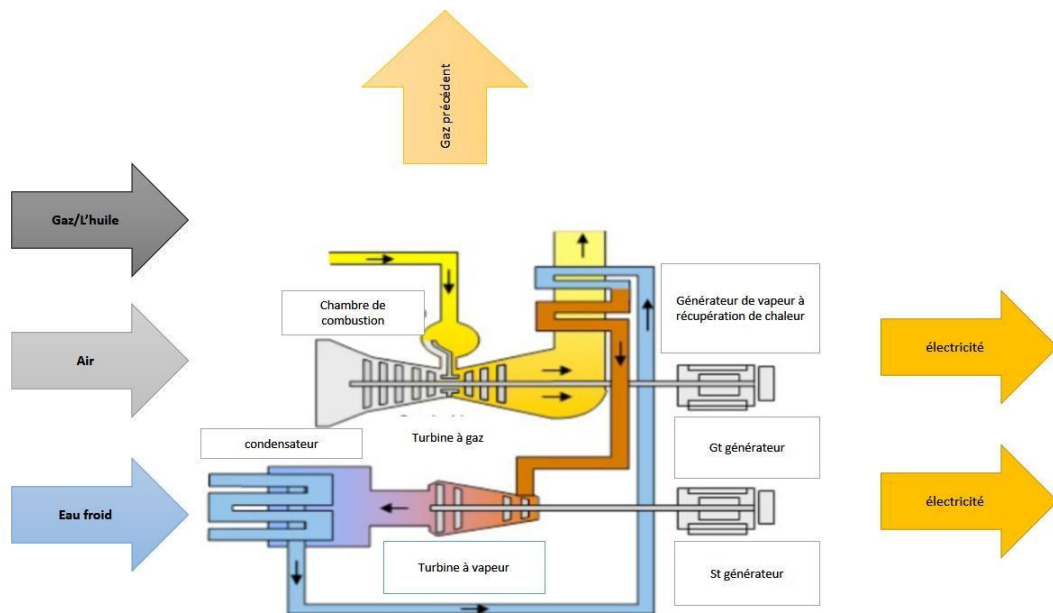


Figure 1.3 : fonctionnement d'une centrale à cycle combiné gaz

1.3.4 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont importantes pour les êtres humains depuis le début de la civilisation. Elles présentent le plus grand taux de croissance parmi les sources d'énergie. Certains nombres de facteurs sont à l'origine de cette attention accrue sur les sources d'énergies renouvelables. De plus, l'émergence de politiques gouvernementales a été essentielle dans la promotion des énergies renouvelables comme solution viable, composante du portefeuille d'énergie des différents pays. Les sources d'énergies renouvelables (à l'exception de l'hydroélectricité) continueront d'offrir plus de potentiel que la production actuelle basée sur les

sources d'énergie fossile [7]. On distingue cinq grands types d'énergie renouvelable: Géothermique, Biomasse, hydraulique, éolien, Solaire.

1.3.5 Géothermique

Le principe de géothermie consiste à puiser dans une nappe phréatique ou le plus souvent à prélever l'énergie gratuite contenue dans le sol pour chauffer une habitation, cette énergie est constamment renouvelée par la nature, le soleil, le vent, la pluie, c'est donc une énergie renouvelable [14]. Différents types de captage et source d'énergie:

- Capture horizontale
- Capture verticale, sans géothermie.
- Capture par nappe phréatique.

1.3.6 L'énergie hydraulique

Énergie hydroélectrique exploite l'énergie potentielle des flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins, etc.). L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur, elle représente la première source renouvelable et la troisième source générale de production électrique au monde (16,3 % en 2011) [20] [16].

1.3.7 Énergies solaire

Le soleil est à l'origine de nombreuses énergies renouvelables. Ainsi peut-on considérer l'énergie solaire comme une ressource énergétique renouvelable fondamentale dans le monde. Il y a cependant différentes sortes d'énergie solaire [17].

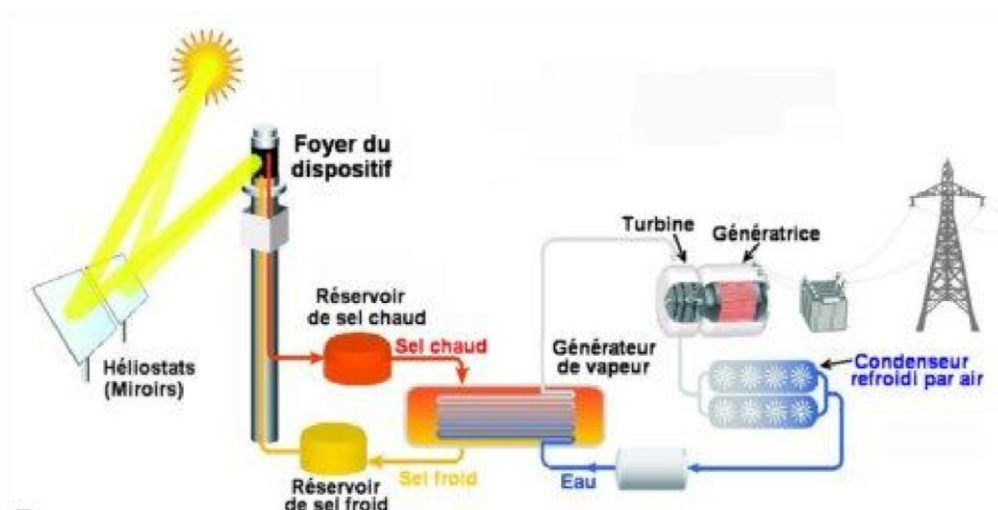


Figure 1.4 : Technologie de la tour solaire.

- La conversion directe de l'énergie solaire en chaleur : le solaire thermique

On peut aussi utiliser directement la chaleur rayonnée par le soleil pour chauffer de l'eau et actionner des turbines comme dans les centrales thermiques[10]. Les centrales solaires à concentration (CSP Concentration Solar Power) concentrent à l'aide de miroirs ou de lentilles paraboliques l'énergie solaire. L'énergie thermique haute température collectée met en marche les générateurs turbines pour la production d'électricité.

- La conversion directe de l'énergie solaire en électricité : le photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est un thème au centre de l'actualité depuis la présentation du plan d'action du Grenelle de l'Environnement. Elle ne doit pas être confondue avec l'énergie solaire thermique (qui produit de la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge afin de chauffer de l'eau ou de l'air). L'énergie photovoltaïque convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique par le biais de modules photovoltaïques composés de cellules solaires (photopiles). Selon les besoins, l'électricité produite peut être utilisée pour l'alimentation d'un site isolé ou revendue en tout ou partie au réseau de distribution [21].

1.4 Qu'est-ce qu'un système hybride d'énergie ?

De façon générale, un système hybride d'énergie est un système qui combine différents systèmes de production. Par exemple, system photovoltaïque. Ils sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées [3]

1.4.1 Etudes des structures de systèmes hybrides

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, systèmes hybride avec source d'énergie conventionnelle comme un système photovoltaïque, une éolienne, et dans le deuxième groupe les systèmes hybride sans source d'énergie.

➤ *Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle*

- Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel
- Systèmes éolien/source conventionnelle
- Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle

➤ *Systèmes hybrides sans source conventionnelle*

Ces systèmes hybrides fonctionnent surtout en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible [22].

- **Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage**

Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage : L'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux [22].

1.5 Systèmes de Stockage d'énergie (SSE)

Stocker de l'énergie c'est garder une quantité d'énergie pour une utilisation future. Par extension, l'enjeu du "stockage d'énergie" est d'apporter de la flexibilité et de renforcer la fiabilité

des systèmes énergétiques. Il s'agit d'équilibrer l'offre et la demande en énergie, aussi bien pour la fourniture d'électricité que de chaleur ou de froid.

Aujourd'hui, la réponse aux « pointes » de consommation, c'est -à-dire la régulation de la demande d'électricité aux heures pleines. de forte demande, est principalement réalisée soit par l'importation d'électricité, le stockage stationnaire de l'énergie, aussi bien le stockage d'électricité que le stockage thermique, est associé au développement des énergies renouvelables en garantissant un courant de « qualité » sur le réseau de distribution.

En effet, la production intermittente d'électricité grâce aux énergies solaires et/ou éoliennes engendre des fluctuations importantes qui perturbent et détériorent les équipements de distribution. Il existe cinq catégories physico-chimiques de stockage stationnaire selon que l'énergie stockée soit sous forme mécanique, chimique, thermique, électrochimique ou électromagnétique [23].

1.5.1 Dispositifs de stockage de l'énergie

Dans le cas d'une unité de production non raccordée au réseau la présence d'un dispositif de stockage s'impose dans la mesure où la consommation et la production sont fortement découplées. Le système de stockage est dimensionné, comme on l'a vu précédemment, par sa capacité de stockage, mais pas seulement. Il doit en effet également répondre aux critères suivants : puissance

crête déterminée; Cyclabilité élevée; bon rendement en charge et en décharge dans la gamme de puissance en production et en consommation; pertes d'auto-décharges faibles; coûts Réduits.

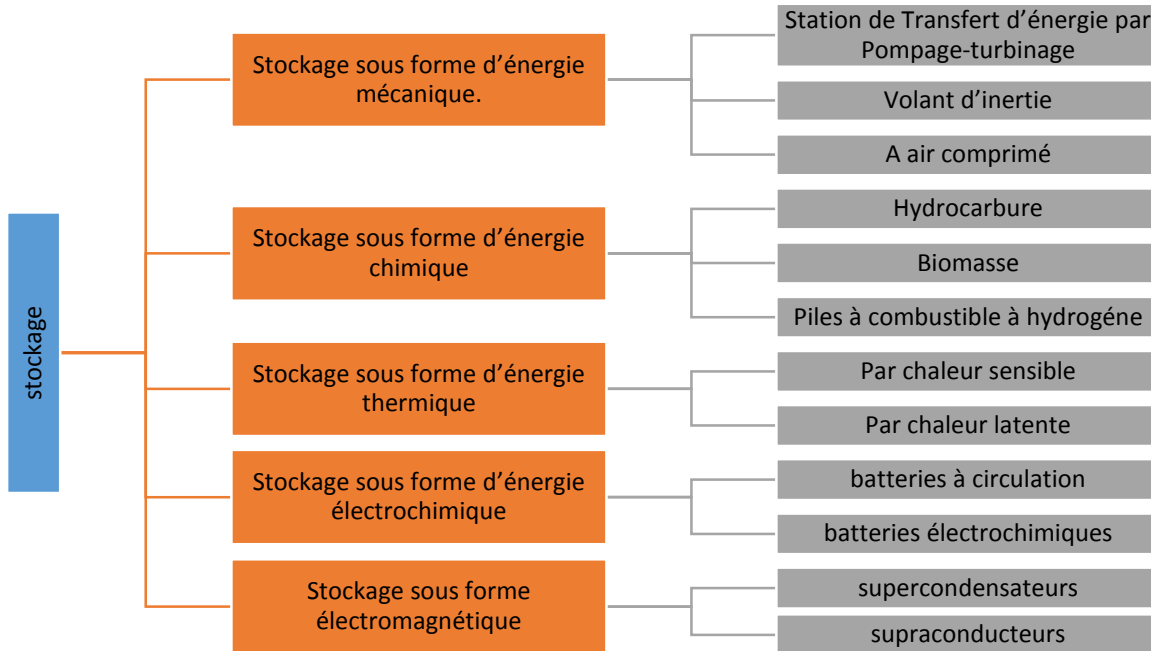


Figure 1.5 : les différentes formes de stockage énergétique [24]-[33]

1.6 Comparaison entre les modes de stockage

Les solutions de stockage sont nombreuses mais tellement différentes dans leurs spécifications qu'elles sont difficiles à comparer. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de présenter un ensemble de caractéristiques techniques et économiques qui permettent d'améliorer les conditions d'acceptabilité des SSE. La figure 1.7 place les différents SSE soit selon leur puissance ou énergie : petites (de l'ordre du kW, kWh) ou grandes (de l'ordre du MW, MWh ou du GW, GWh), soit selon leur temps de réponse : court (de l'ordre de la seconde, minute) ou long (de l'ordre de l'heure)

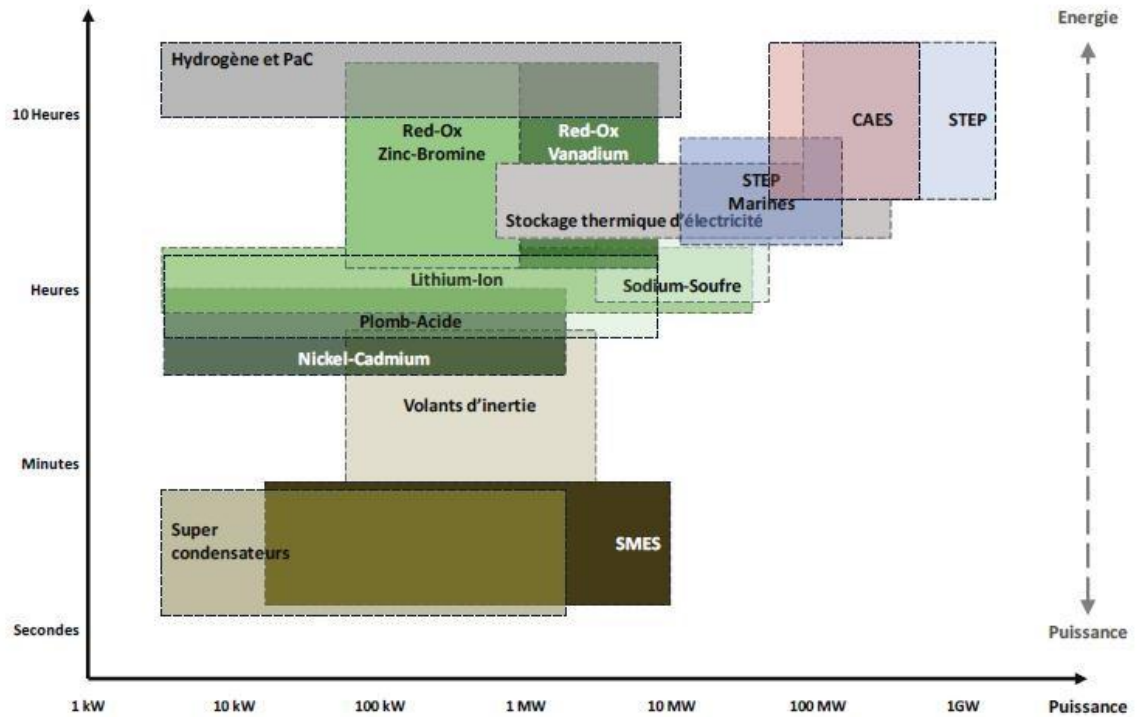


Figure1.7 :- Répartition des SSE par puissance/temps de réponse [23].

Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante comme le montre la figure 1.8

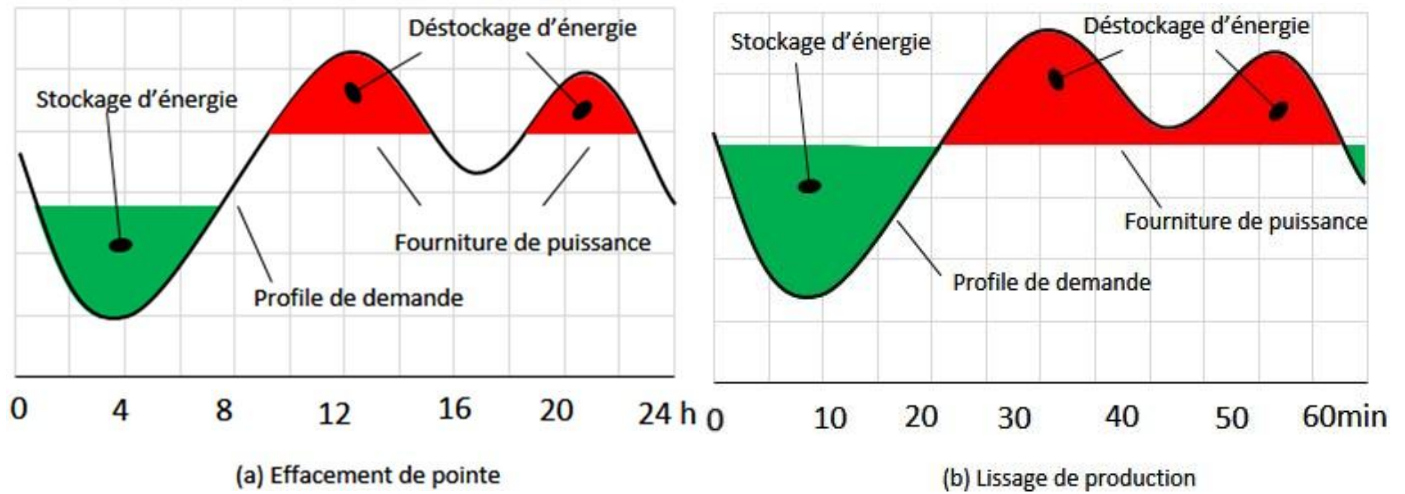


Figure1. 8 :- Applications du stockage d'énergie : équilibre offre- Demande[23]

1.7 Contexte énergétique et environnemental Algérien

Dès les années 1962, le secteur de l'électricité a connu un très grand développement pour répondre à une volonté de généralisation de l'électrification des ménages à travers tout le territoire national. Durant ces dernières années, la consommation de l'électricité en Algérie a été en forte progression, notamment dans le secteur résidentiel, à cause de la croissance démographique élevée, l'amélioration du niveau de vie, et le phénomène de l'urbanisation qui est de plus en plus important. Cette tendance est appelée à se poursuivre pour les années à venir, ce qui conduira à de fortes contraintes technico économiques, en terme d'infrastructures de production et de développement de réseaux de distribution électrique.

1.7.1 Production d'électricité

Les impératifs de préservation de l'environnement imposent l'utilisation du gaz naturel comme énergie primaire pour la production d'électricité, par rapport aux autres énergies fossiles jugées polluantes, sachant que la ressource du gaz est largement disponible en Algérie. La production nationale d'énergie électrique (y compris les auto producteurs) a atteint 76,6 TWh en 2018, contre 59,8 TWh en 2018, en hausse de 28% ce qui dénote les efforts consentis en termes

d'investissements pour un approvisionnement adéquat du marché national, notamment en période d'été [34]. La répartition de la production d'électricité par origine, est donnée ci-après :

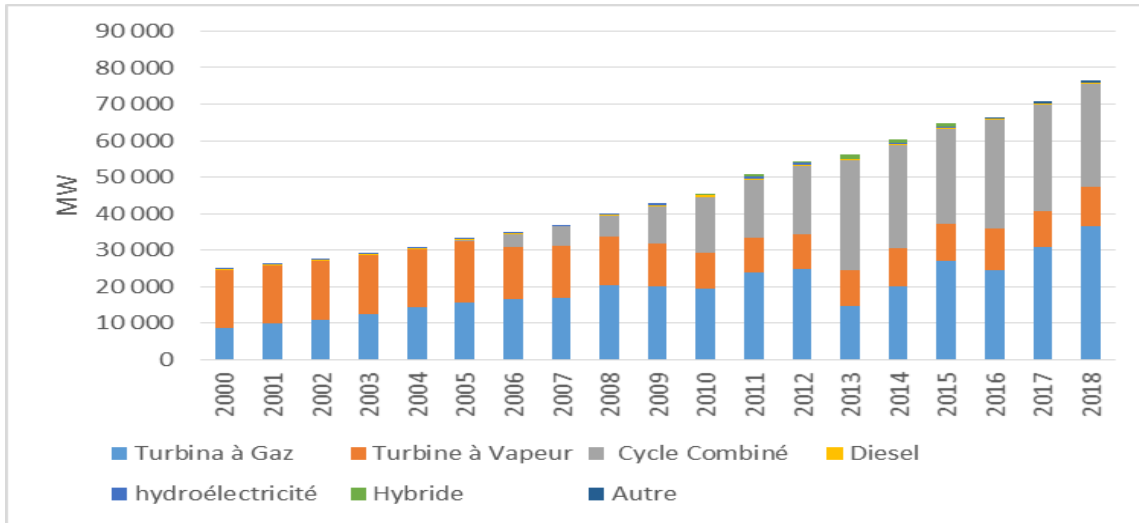


Figure 1.9 : Evolution de la puissance installée par type d'équipement (en MW) sur la période (1962-2018) [34].

Dans la figure1.9, nous notons que la puissance électrique installée est en augmentation et on observe que la production d'électricité en Algérie dépend principalement des technologies basées sur la turbine à gaz (TG) et le cycle combiné (C.C).

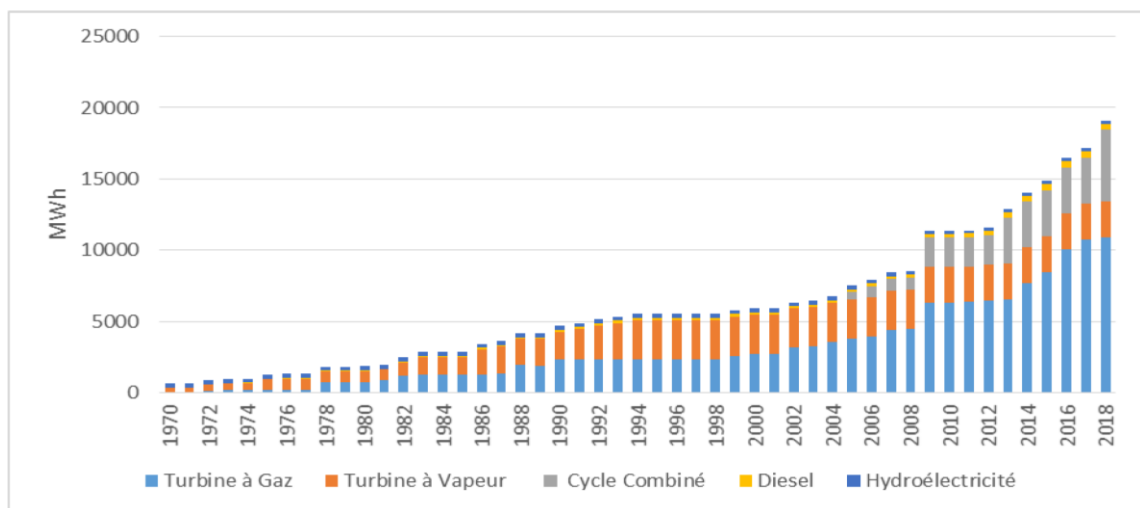


Figure 1.10 : Evolution de la production d'électricité par type d'équipement (en MWh) sur la période (1962-2018) [35].

Dans la **figure 1.10**, nous notons que l'évolution de la production de l'énergie électrique par type d'équipement est en augmentation, et on observe que cette augmentation dépend principalement des technologies de la turbine à gaz (TG) et du cycle combiné (C.C).

1.7.2 Potentiel national des énergies renouvelables

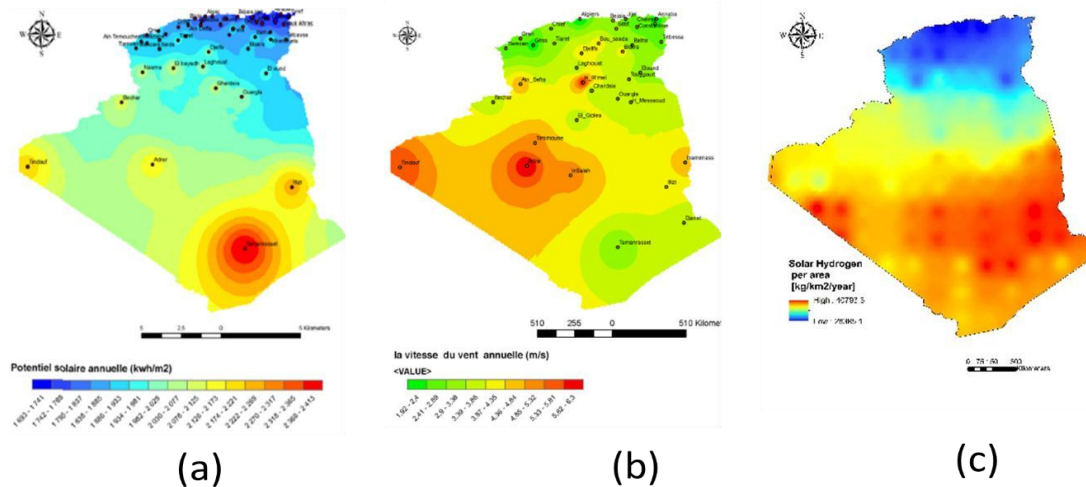


Figure 1.11 : Potentiel national des énergies renouvelables, (a) carte d'irradiations solaires[17], (b) carte de vitesse de vent[36], (c) carte de hydrogéné solaire [37].

La figure1.11 représente (a) une cartographie de irradiation solaires reçues sur un plan horizontal en kWh/m².an et (c) carte de hydrogéné solaire un potentiel important de l'énergie solaire est disponible, et diffère remarquablement selon la région en Algérie. La moyenne de l'énergie solaire annuelle sur un mètre carré d'un plan horizontal est d'environ 2 MWh sur la majeure partie du territoire national.

1.7.2.1 Potentiel d'énergie solaire

De par sa situation géographique, Le pays possède un potentiel très important en énergie solaire. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara)[38]. D'une manière globale, l'Algérie dispose d'un potentiel énergétique solaire (GHI) d'environ 13,9 TWh/an pour le PV. Le gisement solaire constitue, sans aucun doute, le gisement d'avenir pour l'Algérie. La disponibilité de grands espaces au Sahara et dans la steppe et une forte intensité solaire (2200 kW/m².an) représentent des atouts majeurs pour produire une énergie renouvelable, propre et durable en Algérie, le potentiel solaire algérien est équivalent à un volume de 37,000 milliards de mètres cubes, soit plus de 8 fois les réserves de gaz naturel du pays, à la différence que le potentiel solaire est renouvelable, contrairement au gaz naturel. Le tableau suivant donne le potentiel solaire algérien en chiffres et selon la localisation.

Tableau 1.2. : Potentiel Solaire en Algérie

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée Moyenne D'enseillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie Moyenne Reçue (kWh/m ² .an)	1700	1900	2650

1.7.2.2 Potentiel Eolien

En Algérie, le potentiel éolien est relativement modéré, les vitesses du vent varient entre 2 et 6 m/s. Ce potentiel énergétique est idéal pour pomper l'eau dans les Hauts Plateaux, mais il est marginal pour les grands projets commerciaux [36].

1.7.2.3 Potentiels d'hydrogène solaire

Messaoudi et al [37] présenté une estimation de l'hydrogène solaire, la figure 1.11 montre le potentiel d'hydrogène de l'énergie solaire selon la figure d'hydrogène solaire, il existe un potentiel important d'hydrogène solaire énergétique disponible et il varie considérablement en

Algérie. De plus, il semble que les régions du sud sont plus prometteuses que d'autres pour leur exploitation des matériaux solaire dans la production d'hydrogène notamment, lys un fort potentiel d'hydrogène solaire estimé à 28385,1 kg/km².an et une quantité minimale d'hydrogène solaire annuel disponible sur le littoral a été obtenue dans certains les régions du nord, en particulier Jijel et Blida, qui se trouvent autour de 40793,3 Kg/Km². an.

1.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le Contexte énergétique et environnemental Algérien et le secteur de l'énergie électrique en particulier, qui est connu un fort développement dans ces dernières années en raison de l'augmentation de population, pour cet effet le gouvernement a augmenté les capacités de production d'électricité pour couvrir les besoins des citoyens. Les énergies renouvelables représentent une solution à ce problème. Cependant, seules, elles n'arriveront pas à répondre à nos besoins futurs en énergie et à remplacer les ressources fossiles. La constatation de pertes considérables d'énergie a poussé la recherche à découvrir des solutions alternatives pour les récupérer.

Chapiter2:

*Description d'un système
hybride de à bas d'hydrogène*

2.1 Introduction

Pour un développement durable, le recours à l'utilisation des systèmes énergétiques à sources d'énergies renouvelables est devenu indispensable. Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono source, présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient vraiment attractif. Pour l'énergie de demain, l'hydrogène est un vecteur énergétique qui ouvre la voie à de nouvelles façons de stocker, La production d'hydrogène par électrolyse est en effet une méthode de production flexible. Nous allons présenter dans ce chapitre les étapes de stockage d'hydrogène par un Système hybride au réseau autonome et constitué des éléments suivants : réseau électrique, photovoltaïque, électrolyseur, réservoir de stockage (O₂ et H₂) et la pile à combustible.

2.2 Système hybride à base hydrogène

Les énergies du solaire sont omniprésents, disponibles gratuitement, et respectueux de l'environnement. Au cours des dernières années, la combinaison de ces sources d'énergie renouvelables système hybride photovoltaïque est devenue une alternative attrayante et viable à l'énergie fossile produite pour répondre à la demande d'électricité. Les composants de ce système d'énergie hybride se composent de deux sources d'énergie (PV et réseaux électrique). Dans la figure 2.1, nous présentons un système hybride de stockage d'énergie à base d'hydrogène dans un réseau autonome.

Selon les besoins en énergie durant la journée, Le système hybride d'énergie renouvelable est étudié pour l'alimentation électrique utilisée l'électrolyseur pour fractionner l'eau en hydrogène et en oxygène.

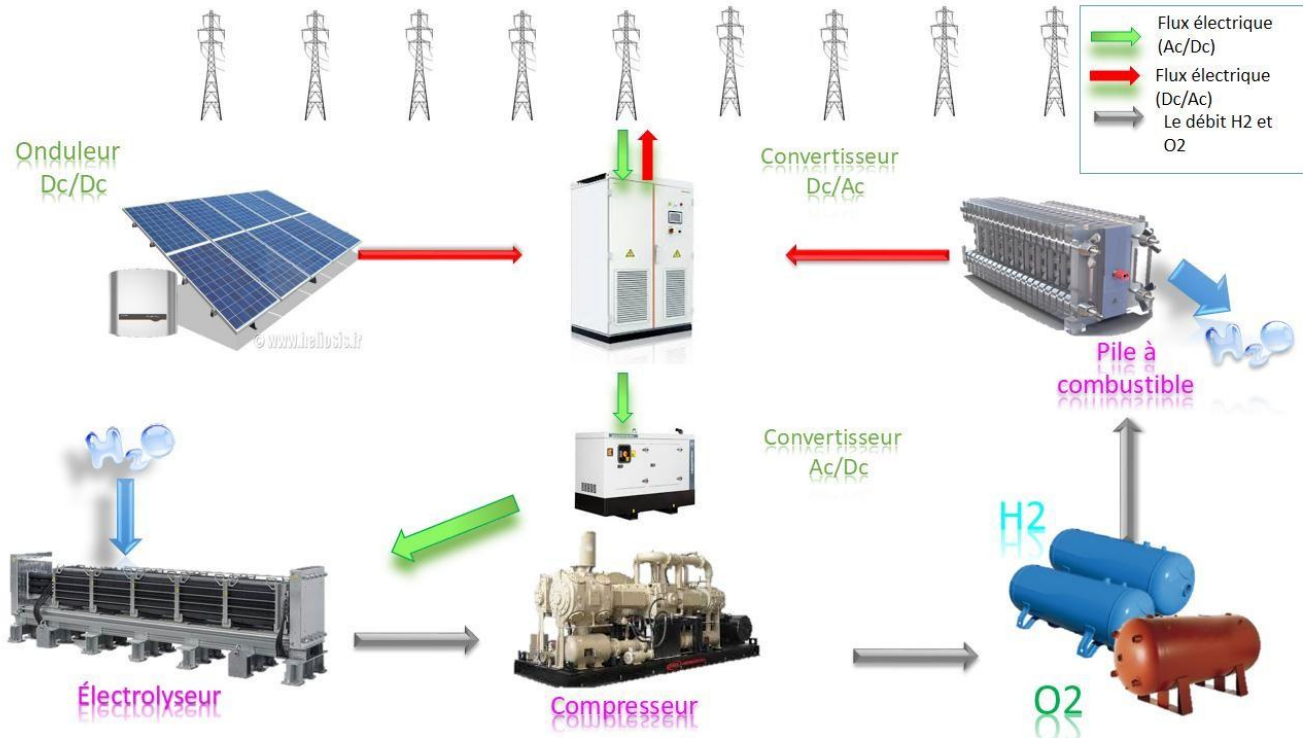


Figure 2.1 : Système hybride de stockage d'énergie à base d'hydrogène dans un réseau autonome.

Dans ce système il y'a un électrolyseur de type PEM, un convertisseur AC/DC associé à l'électrolyseur et photovoltaïque DC/DC un convertisseur DC/AC qui est inclus dans ce sous-système. Une pile à combustible de type PEM et un convertisseur DC / AC associé aux piles à combustible est inclus dans ce sous-système, Deux réservoirs H₂ et un réservoir O₂ d'une capacité individuelle équivalente et un réservoir d'eau qui récupère la production d'eau issue de la pile à combustible et assure l'alimentation en eau de l'électrolyseur.

2.2.1 Système hybride : photovoltaïque

Un Système Hybride à Energies Renouvelables (SHER) combine deux ou plusieurs technologies d'énergies renouvelables comme les panneaux photovoltaïques, les éoliennes, les petites turbines hydroélectriques, etc. En outre, il comprend des équipements d'électronique de puissance et des systèmes de stockage. Trois architectures s'imposent parmi les SHER à savoir : architecture à bus Courant Continue CC, architecture à bus Courant Alternative CA et architecture mixte à bus CC-CA [3].

- Architecture à bus CC
- Architecture à bus CA
- Architecture mixte à bus CC/CA

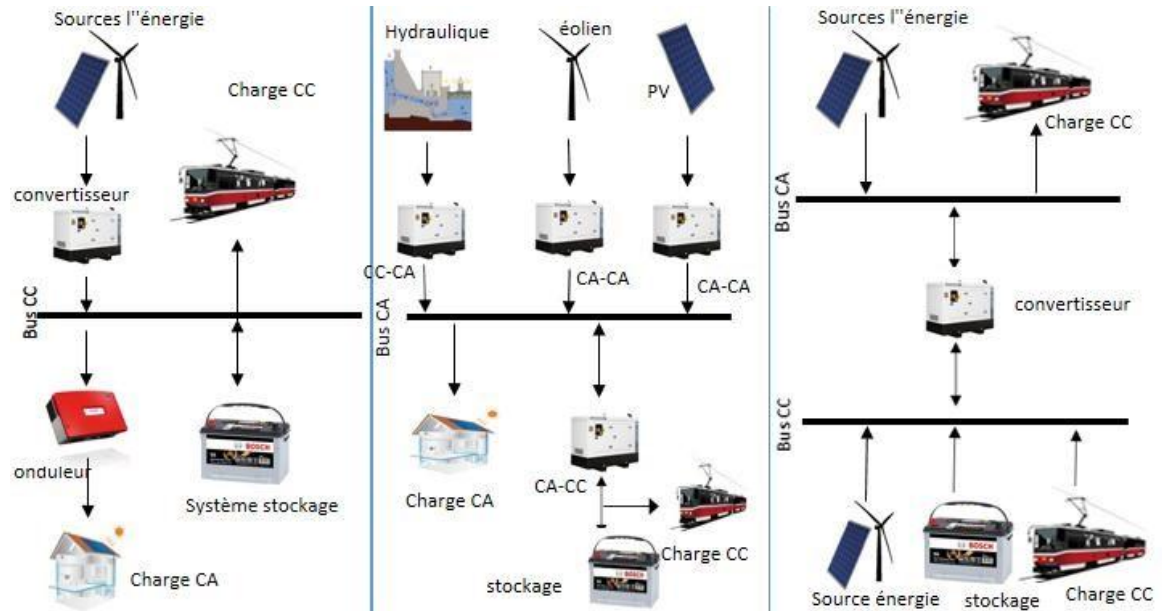


Figure 2.2 : Structure de SHER à bus à (courant continu, courant alternatif, continu et alternatif)

2.2.2 Le réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques, exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution.

2.2.3 Mécanisme de distribution d'énergie électrique :

Les EPC (electrical power companies) ont transmis de l'électricité à partir de l'EPGS (electrical power génération station) à très haute tension[39]. En Algérie depuis juin 2002) définissent les niveaux de tension alternative comme suit Les compagnies d'électricité divisent leur

réseau en quatre grandes catégories : le réseau de transport (300-800) kV, réseau de répartition (60-300) kV, réseau de distribution MT (160) kV et réseau de livraison de l'abonner BT (220-1) kV.

EPC fournit de l'électricité puissance à divers secteurs tels que commercial, industriel et domestique. Pour les consommateurs domestiques et les petites entreprises commerciales, EPC abaisse la tension via différents transformateurs abaisseur sur le support de poteau électrique au sol. L'EPC sera propriétaire du transformateur, qui se montera à l'extérieur de la cour et sera attaché au poteau électrique. Le transformateur abaisseur réduit la tension de la très haute tension à la baisse à 120/240 Volt pour la consommation domestique, puis il transmet l'électricité au compteur. Après cela, l'énergie électrique est distribuée à travers un compteur à l'intérieur du bâtiment. Le compteur est un appareil appartenant à l'électricité qui est utilisé pour alimenter la transmission dans le bâtiment et tenir un registre de la consommation d'énergie

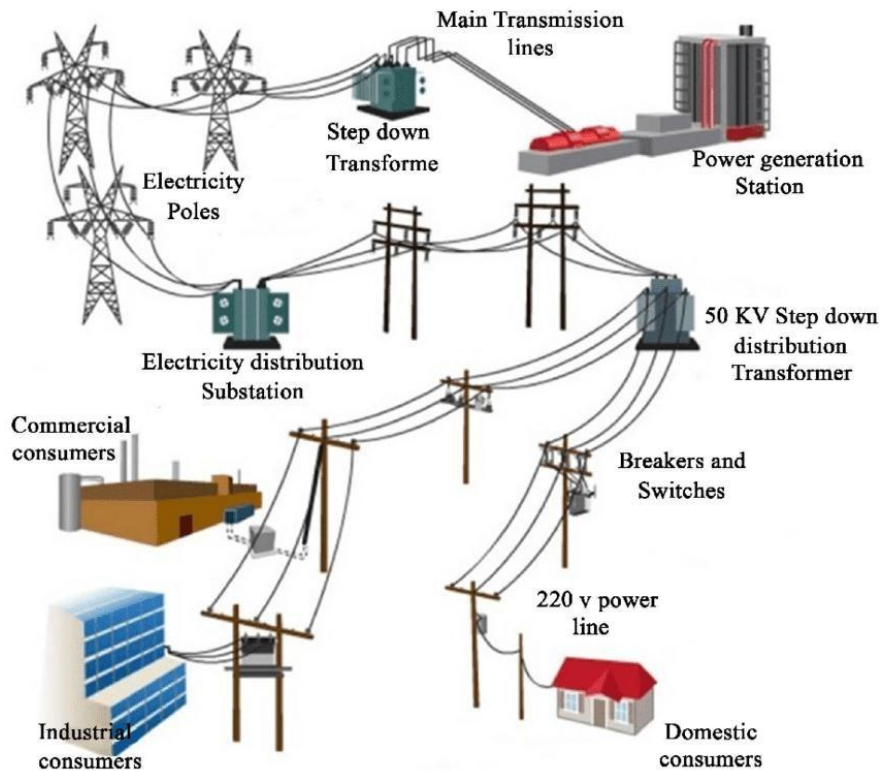


Figure 2.3 : Réseau de distribution d'électricité

Figure 2.3 : Illustre le réseau de distribution d'électricité de l'EPGS à la maison individuelle. Bien que le fil de l'alimentation électrique en mètre soit transféré au panneau, il est situé dans la

cour ou à l'extérieur de la maison. Le panneau est composé de différents circuits de service et de disjoncteurs qui contrôlent le flux d'énergie électrique.

2.3 Généralité sur les technologies de Photovoltaïques :

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[40]. La conversion photovoltaïque exploitée par les cellules du même nom requiert deux phénomènes :

- Transferts d'énergie des photons aux porteurs de charge par interaction lumière.
- matière et collecte des porteurs ainsi excités comme l'illustre la Figure 2.4.

La première condition est réalisée par l'emploi d'un matériau semi-conducteur, par exemple du silicium. La deuxième est réalisée par la présence d'un champ électrique au sein du matériau, par exemple au moyen à l'interface d'une jonction semi-conductrice.

Les cellules photovoltaïques sont donc communément faites d'une jonction PN en silicium. C'est un dopage de type N où il y a un excès d'électrons. La juxtaposition de ces deux matériaux dopés génère un champ électrique interne à l'interface[41].

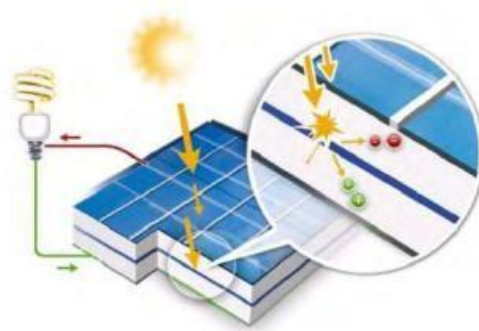


Figure 2.4 : fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

2.3.1 Les modèle des photovoltaïques

Un panneau photovoltaïque, appelé module, est constitué de cellules photovoltaïques connectées en série et en parallèle. Les caractéristiques électriques des modules commercialisés

peuvent être sensiblement différentes à puissance identique selon que le niveau de courant ou de tension est privilégié. Le choix de la caractéristique du champ solaire va dépendre du point de fonctionnement requis par les composants associés (batteries, convertisseurs, électrolyseur). Les générateurs photovoltaïques sont modulaires. Leur puissance varie de manière discrète par pas équivalent à la puissance d'une branche[42]. Paramètre beaucoup plus important : le courant délivré par les modules est proportionnel à l'éclairement reçu par la surface des panneaux. Différents types des cellules photovoltaïques Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent [43][44] .

2.3.2 La distribution des cellules électrique

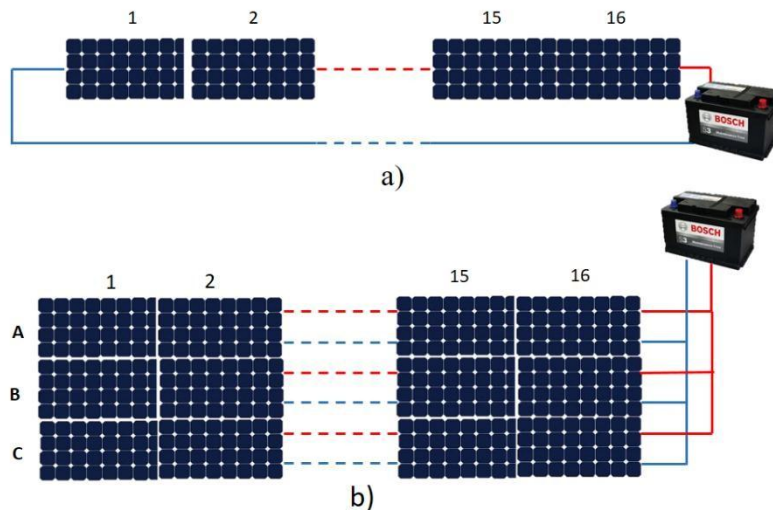


Figure 2.5 : système PV avec câblage série et parallèle [45]

La figure 2. 5 représente un exemple de câblage série et parallèle d'un system photovoltaïque

2.3.2.1 Câblage série

Le câblage en série est lorsque la tension d'un générateur solaire est augmentée en câblant le positif d'un module solaire au négatif d'un autre module solaire. Cela revient à

installer des piles dans une lampe de poche. Lorsque vous faites glisser les piles dans le tube de la lampe de poche, la tension augmente.

2.3.2.2 Câblage parallèle

Le câblage parallèle augmente la sortie de courant (ampères) d'un panneau solaire tout en gardant la même tension. Le câblage parallèle se produit lorsque les positifs de plusieurs modules sont connectés ensemble et que tous les négatifs pour les mêmes modules sont connectés ensemble.

2.3.2.3 Combinaison parallèle série

Voici un exemple de ce que l'on trouve dans la plupart des grands systèmes solaires, une combinaison de câblage série et parallèle

Une des solutions pour diminuer le rapport d'élévation des hacheurs nécessaires à la topologie hacheur modulaire parallèle est de mettre la sortie des hacheurs en série. Ainsi le rapport d'élévation est d'autant diminué que le nombre de hacheurs en série est augmenté .La *Figure 2.6* montre le hacheur modulaire série [46]

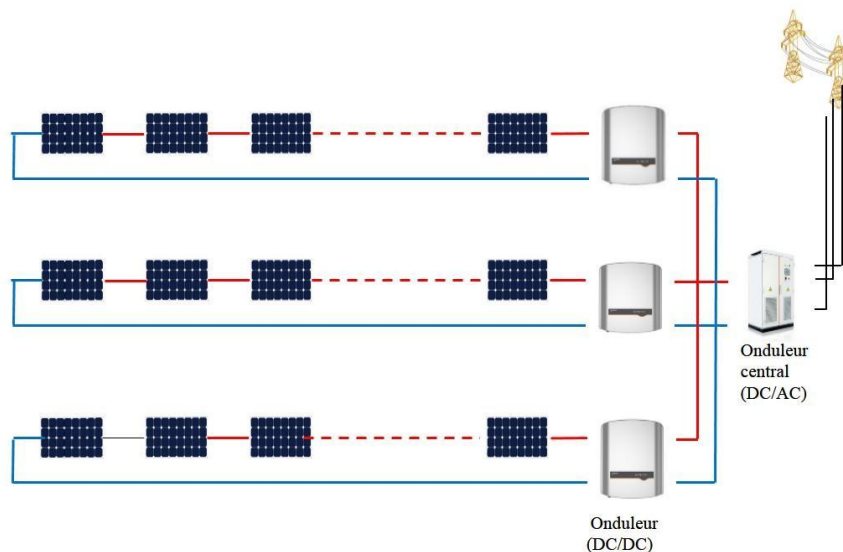


Figure 2.6: système PV avec hacheur série [47]

2.4 Etude sur généralité de production hydrogène

2.4.1 Modes de production de l'hydrogène

L'hydrogène existe à l'état naturel, mais n'est pas exploité industriellement. Il est très abondant dans l'eau (H₂O) associé à l'oxygène et dans les hydrocarbures, en particulier le gaz naturel (CH₄) associé au carbone. Aujourd'hui, il existe plusieurs filières technologiques qui permettent de produire de l'hydrogène à partir de différentes sources : Vaporeformage du gaz naturel , les procédés thermochimiques de gazéification ,Electrolyse de l'eau[48] et Par photosynthèse différents microorganismes .

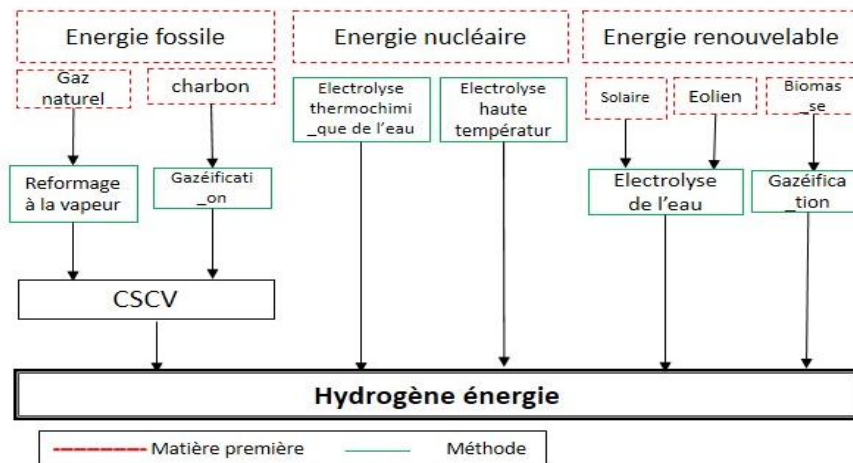


Figure 2.7 : principe méthodes de la production d'hydrogéné [49].

2.5 L'électrolyseur

Un électrolyseur est l'appareil inverse de la pile à combustible. L'électrolyseur dispositif qui génère de l'hydrogène, est une cellule électrolytique qui est alimentée par un courant électrique provenant d'une source externe (system hybride). Il décompose l'eau en hydrogène et oxygène lorsqu'il est électriquement aliment afin de produire la réaction d'oxydo-réduction électrochimique. Les électrolyseurs à membrane ont de mauvaises performances de cellules Par contre, leur contrôle est plus simple. Il est préférable d'utiliser un électrolyseur haute pression afin d'éviter l'utilisation d'un compresseur énergivore pour réduire la taille de l'unité de stockage de gaz [50].

Dans l'anode apparaissent des atomes d'oxygène, des protons et des électrons; tandis que dans la cathode se produit une réaction de réduction dans laquelle les protons (H^+) forment avec les électrons des molécules d'hydrogène gazeux [51]. Les pièces qui constituent un électrolyseur sont les suivantes: deux plaques qui fonctionnent comme anode et cathode ; deux mailles qui distribuent le courant électrique; deux diffuseurs de gaz et les électrodes à membrane (MEA), c'est-à-dire la structure principale de l'électrolyseur[50].

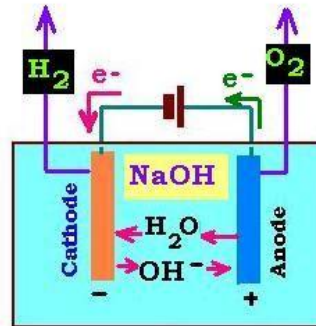


Figure 2.8 : principe du travail d'électrolyse généralement.

Les principaux aspects de l'utilisation des électrolyseurs sont qu'ils pourraient être couplés à une source d'énergie renouvelable et diminuer ainsi l'émission de contaminants atmosphériques [52]. Les électrolyseurs alcalins ont de très bonnes performances au niveau des cellules (rendement potentiel : 80 %, rendement faradique : 99 %) mais le périphérique nécessaire induit une forte consommation intrinsèque.

2.5.1 Les types d'électrolyseur

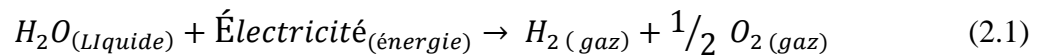
Les différents systèmes d'électrolytes développés pour l'électrolyse de l'eau incluent l'électrolyse alcaline de l'eau (AWE), les membranes échangeuses de protons (MEP), les membranes alcalines échangeuses d'anions (MEA) et l'électrolyse de l'eau à oxyde solide (SOE). Différents matériaux et conditions de fonctionnement sont utilisés dans ces systèmes, cependant, les principes de fonctionnement sont les mêmes. Sur la base de différentes températures de fonctionnement, une électrolyse de l'eau à basse et haute température est également possible.

Tableau 2.1 : Les différents type d'électrolyseur [53]

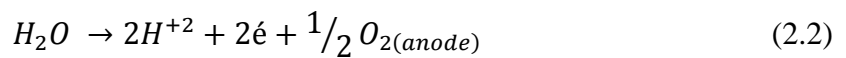
Principes de fonctionnement	Electrolyse à basse température			Electrolyse à haute température		
	Electrolyse alcaline (OH^-)		Electrolyse par échange de protons (H^+)		Electrolyse des ions oxygène (O^{2-})	
	Liquide	Membrane électrolyte polymère	Electrolyse d'oxyde solide (SOE)			
	conventionnel	Alcalin solide	H^+ - PEM	H^+ - SOE	O^{2-} - SOE	CO-électrolyse
Réaction anodique électrolyte de la température du support de charge (OER)	OH^-	OH^-	H^+	H^+	O^{2-}	O^{2-}
	20_80°C	20_200°C	20_200°C	500_1000°C	500_1000 °C	750_900 °C
	Liquide	Solide (polymérique)	Solide (polymérique)	Solide (céramique)	Solide (céramique)	Solide (céramique)
	$4OH^- \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-$	$4OH^- \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-$	$2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^-$	$2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^-$	$O^{2-} \rightarrow 1/2 O_2 + 2e^-$	$O^{2-} \rightarrow 1/2 O_2 + 2e^-$
A nodes	Ni >CO> Fe oxyde pérovskites	Ni _ base	Iro2_Ruo2, IrxRu1-xo2 soutiens : Tio2, ITo, Tic	Pérovskites à conductivité électronique protonique	Lax, Sr1x, Mno3+y- Zro2(LS M_YSZ)	Lax , Sr1x ,Mno3+y- Zro2(LS M_YSZ)
C athodique	Ni alliages	Ni, Ni _ Fe Ni Fe2O4	Pt /C MOS2	Ni _ cermets	Ni _ YSZ sous-marin Lacro3	-2 Ni _ YSZ pérovskites
efficacité	59-70%	-	65_82%	Jusqu'à100%	Jusqu'à100%	-
Applicabilité	Commercial	Echelle de laboratoire	Près de tem la commercialisation	Echelle de laboratoire	Manifestation	Echelle de laboratoire

Avantages	Faible coût en capital, relativement stable, technologie mature	Combinaison d'alcalin et H ₊ _PEM électrolyse	Conception compacte réponse rapide/démarrer haut pureté H ₂ 1	Thermodynamique cinétique améliorée : faible consommation d'énergie exige un faible coût en capital	+production directe de gaz synthèse
Inconvénients	Permettions des gaz électrolytiques corrosifs dynamiques lents	Faible conductivité OH- dans les membranes polymères	Membranes polymères coûteuses acides : métaux nobles	Les électrodes mécaniquement instables (craquage) utilisent un scellement incorrect	

Nous avons choisi le type d'électrolyseur PEM, est une technologie alcaline nous semble préférable car l'optimisation du périphérique permettra d'obtenir les meilleurs rendements globaux. En raison des caractéristiques suivantes : La réponse rapide, l'efficacité élevée, la conception compacte et la pression de sortie élevée font de l'électrolyse PEM une technologie de production d'hydrogène prometteuse. De plus, l'équilibrage des installations d'électrolyse PEM est beaucoup plus simple, ce qui est plus attrayant pour les applications industrielles. Cependant, les coûts des métaux précieux utilisés comme électro catalyseurs pour l'électrolyse de PEM rendent l'électrolyse de PEM plus coûteuse que l'électrolyse alcaline. Les électrons circulant le long du circuit conducteur extérieur. Du gaz oxygène s'accumule du côté de l'anode. Les réactions électrochimiques peuvent être exprimées comme suit:



La réaction au niveau des deux électrodes, anode et cathode peut être exprimée comme suit:



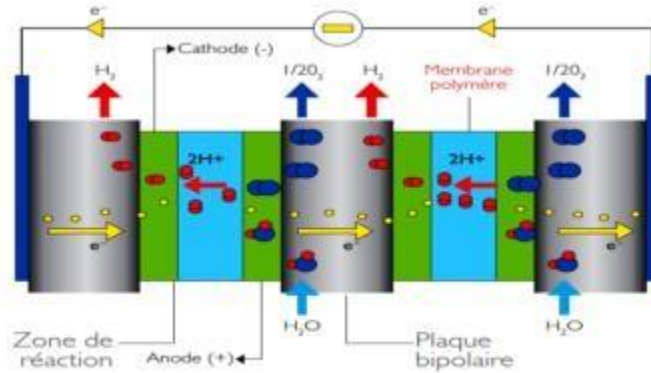


Figure 2.9 : Schéma d'une cellule d'électrolyse PEM [54].

L'électrolyse à membrane polymère est considérée, néanmoins, comme une technologie d'avenir car elle bénéficie des nombreux développements sur les piles à combustible de technologie comparable (PEM), et de la réduction des coûts associée. Les avantages de cette technologie sont l'absence d'électrolyte liquide, la compacité, la simplicité de fabrication, la simplicité du design et du fonctionnement, la limitation des problèmes de corrosion. Ce type d'électrolyseur est particulièrement adapté au couplage à une source d'énergie renouvelable car il supporte, mieux que l'électrolyse alcaline, les variations de puissance électrique disponible[54].

2.6 Bilan sur hydrogène pour l'énergie

L'hydrogène est donc à la fois un vecteur d'énergie potentiel et une ressource utilisée dans l'industrie chimique. Les technologies pour l'exploiter, que ce soit de manière embarquée ou stationnaire, existent déjà. Le principal frein à une révolution hydrogène vient donc du coût économique du déploiement d'infrastructures pour la production, le transport et le stockage de cette ressource. À ces facteurs économiques s'ajoute le frein psychologique à l'usage du dihydrogène, avec la crainte d'explosion et la mauvaise presse résiduelle des dirigeables allemands 4. Sur la figure 2.10, les différentes sources d'hydrogène sont reportées ainsi que les utilisations possibles.

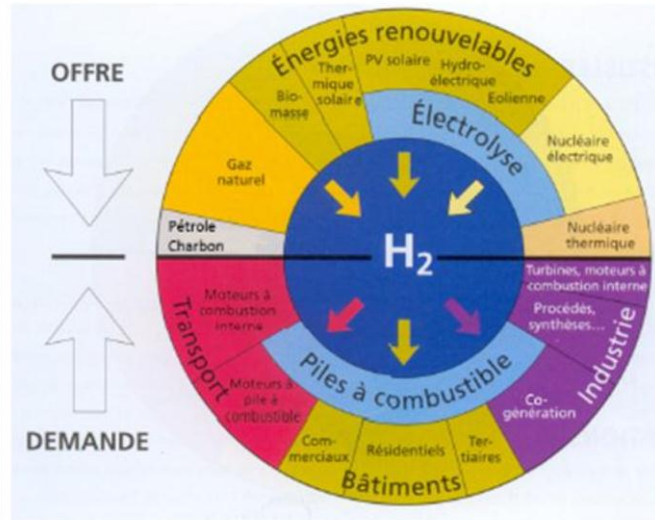


Figure 2.10 :- Panel des applications potentielles de l'hydrogène, d'après l'AFHC[54] .

2.7 Comparaison des méthodes de stockage d'hydrogène

Table 2.2 résume de manière comparative les trois modes de stockage en fonction des avantages et inconvénients évoqués précédemment. Malgré les attraits des stockages solides et liquides, la solution employée reste majoritairement de l'hydrogène gazeux comprimé entre 200 et 700 bars. Les autres modes de stockage ne sont utilisés de nos jours que pour certaines applications de niche. Le stockage par voie solide propose actuellement une solution pleine de potentiel. Il reste l'espoir de développer des stockages plus compacts, plus légers et fonctionnant dans des conditions thermodynamiques plus proches de l'ambiante, en minimisant la masse du système et les cinétiques de chargement déchargement [55].

Table 2.2: Propriétés des différents moyens de stockage de l'hydrogène [55]

	Avantages	Inconvénients
Stockage gazeux	Commercial	Sécurité (pressions) de 200 à 700 bars
	Cinétique	Capacité volumique
	Infrastructures existantes	Coût énergétique de compression pour le stockage ($\approx 12\%$)
Stockage liquide	Commercial	Sécurité (cryo et fuites)
	Haute capacité volumique	Pertes (évaporation)

	Infrastructures existantes	Coût énergétique de la liquéfaction (≈30%)
	Cinétique	
Stockage solide	Sécurité accrue	Capacité massique faible
	Bonne capacité volumique	Cinétique lente
	Flexibilité géométrique	Nécessite la gestion des échanges thermiques
	Coût énergétique de remplissage	Utilisation d'autres matériaux

2.8 La pile à combustible

L'hydrogène peut réagir avec l'oxygène pour libérer de l'énergie électrique et de la chaleur selon le procédé inverse de l'électrolyse de l'eau, composé qui sera, en l'occurrence, le produit de cette réaction. La pile à combustible est donc un dispositif qui produit de l'électricité à partir de cette réaction.[56] [57].

Les principes de base sur lesquels repose la technologie demeurent identiques. A l'instar de toute pile électrochimique, la pile à combustible est composée de deux électrodes et d'un électrolyte. En revanche, les électrodes ne sont pas « consommées » avec le temps.

Le combustible et le comburant proviennent d'une source externe. L'électrode négative (anode) est alimentée en hydrogène et l'électrode positive (cathode) est alimentée en oxygène. L'anode et la cathode sont ensuite mises en contact avec un électrolyte qui permet le transport des ions. Des phénomènes mécaniques présents aux interfaces agissent de manière plus ou moins directe sur les performances et la durée de vie de la pile[58] . La figure 2.11 représente les principes de fonctionnement de pile à combustible.

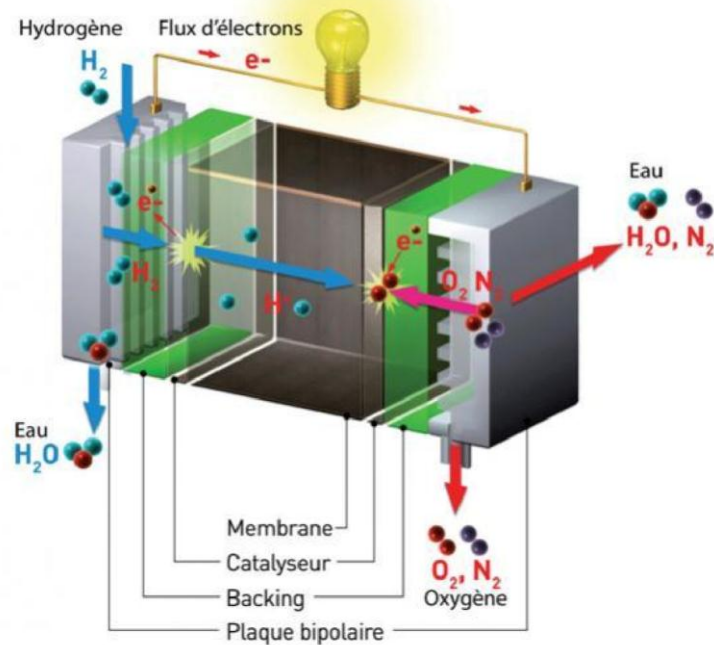
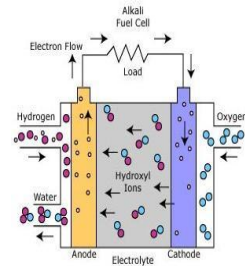
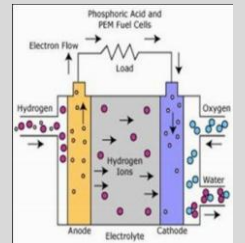
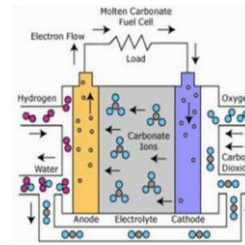
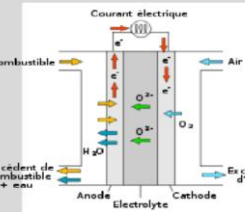
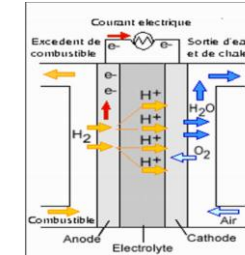


Figure 2.11 :Pile à Combustible [42]

2.8.1.1 Différents types des piles à combustible

La classification des piles à combustible se fait généralement selon la nature de l'électrolyte car celui-ci détermine, d'une part, la température à laquelle la pile fonctionne et, d'autre part, le type d'ion assurant la conduction ionique. Il existe 8 types de piles à combustible qui se différencient entre elles par leur température de fonctionnement et par l'électrolyte donnant son nom à la pile.

Table 2.3: Différents types des piles à combustible [50]

Type s des piles à combustible	Principes de fonctionnement	Matériau électrolytique	Température [C]°	Carburant	Rendement	Réactions chimiques	Applications possibles
Piles à combustible alcalines (AFC)		Solution d'hydroxyde de potassium (KOH) et l'eau	50 à 250°C	L'hydrogène	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)		Solution d'acide phosphorique dans un moule en carbure de silicium	150 à 220°C	L'hydrogène	35 - 45% 5% en cogénération	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 décarbonatés 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% 0% en cogénération	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

La présence d'un reformeur augmente la complexité du système et diminue les rendements énergétiques (rendement du reformeur de 80 à 90 %), si bien que dans certaines piles, on préfère réaliser la combustion électrochimique directe du combustible. Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forment un stack. Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode-membrane électrode (EME).

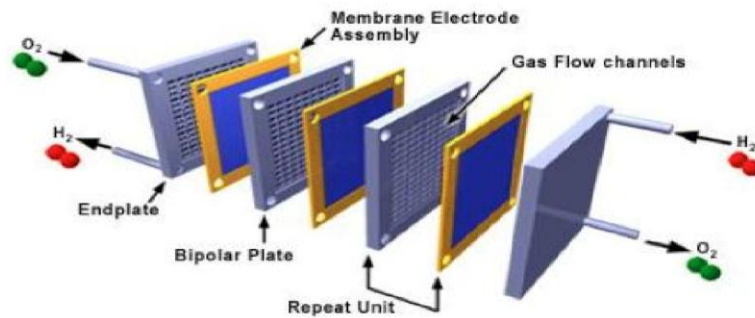


Figure2.12: Structure d'un empilement de cellule PEMFC [Electro Encycl]

La figure 2.12 représente la structure d'une cellule et d'un empilement, cette figure met en évidence trois éléments constitutifs d'une cellule : la membrane, les électrodes (Anode, Cathode) et les plaques. Ces éléments vont être présentés plus en détail dans les trois parties suivantes :

- Membranes polymères ioniques
- Electrodes
- Plaques bipolaires

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un système hybride (réseaux électrique et technologie de photovoltaïque) ensuite, des généralités sur l'hydrogène, sa production par électrolyse de l'eau et les différentes technologies d'électrolyseur. Nous décrivons par la suite la conception et le principe de fonctionnement de l'installation de production d'hydrogène, puis nous présentons le stockage d'hydrogène et enfin les différentes technologies de la pile à combustible, qui produit de l'électricité en étant alimentée par un combustible comme l'hydrogène, est à la base de ces techniques d'avenir.

Chapitre 03 :

Modélisation d'un système

hybride de stockage

d'hydrogène

3.1 Introduction

La modélisation d'un système hybride de stockage d'hydrogène présentera l'analyse et le traitement d'une étude sur la production d'électricité à partir d'un système hybride de stockage d'énergie à base d'hydrogène dans un réseau autonome, et puis une méthodologie d'évaluation énergétique et caractérisation technique du sous-système.

Dans ce chapitre reposerait sur processus électrolytiques associés à de fortes pertes d'énergie : l'électrolyse et les piles à combustible. De plus, entre la conversion d'électricité en hydrogène par électrolyse et la reconversion de l'hydrogène en électricité par les piles à combustible, le gaz vecteur d'énergie doit être conditionné par compression ou liquéfaction. Enfin, représente Le modèle simulation pour le système grille à hydrogène est développé dans Matlab.

3.2 Présentation du cas d'étude

La daïra de N'goussa est une circonscription administrative algérienne située dans la wilaya d'Ouargla. Son chef-lieu est situé sur la commune éponyme de N'goussa. Nous avons choisi la zone de N'goussa comme cas d'étude appliqué du système hybride de stockage d'énergie à base d'hydrogène dans un réseau autonome. N'goussa est une commune de la wilaya de Ouargla en Algérie, comprend une population de 16581 hab. en 2008 et sa densité est de 5,7 hab/km², les coordonnées géographiques sont 32 ° 08 '27 "nord, et 5 ° 18 '30

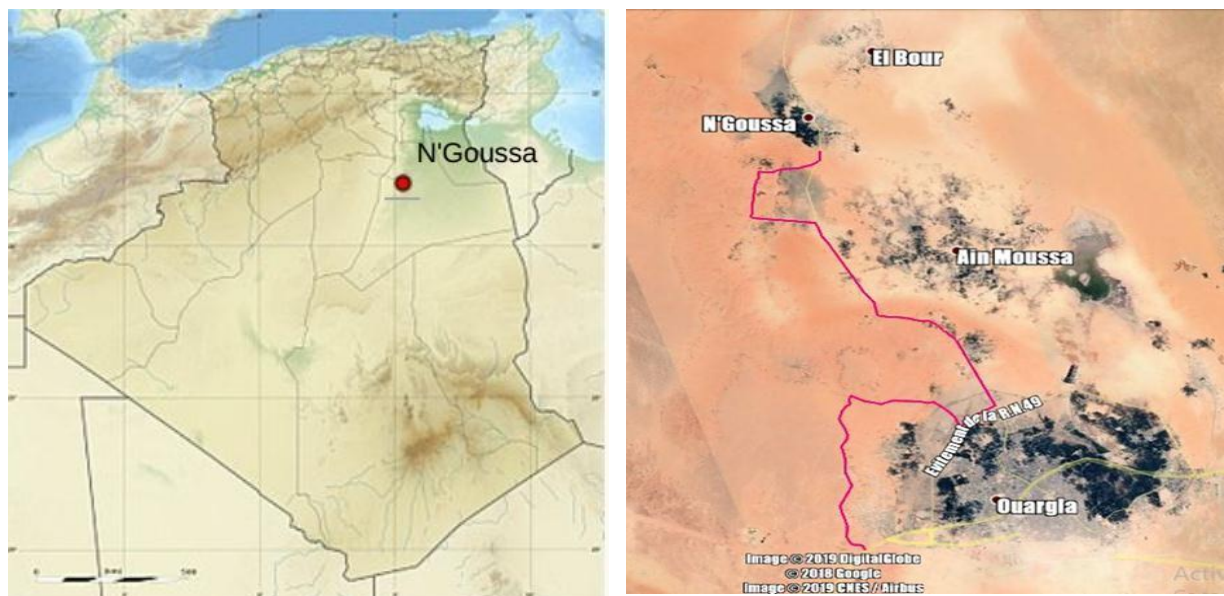


Figure 3.1 : Localisation géographiques de la zone d'étude daïra N'goussa.

Pour appliquer notre système de stockage, nous avons choisi la zone de N'goussa comme cas d'étude, N'goussa est une commune de la wilaya de Ouargla en Algérie. Elle contient une ligne de réseau électrique avec 463 postes électriques, et étendue sur une superficie d'environ de 2900 km².

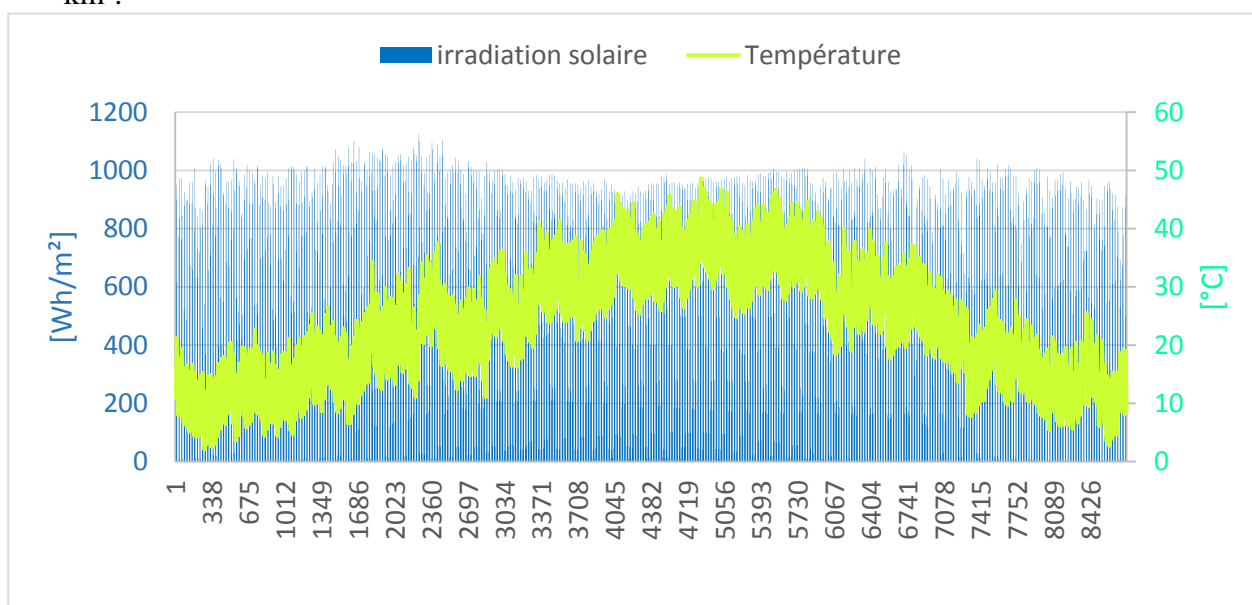


Figure 3.2 : valeurs de rayonnement solaire et durée d'ensoleillement pour la région de N'goussa

Dans notre étude, nous avons identifié l'invasion d'une zone propice l'énergie solaire, La figure3.2 représente le rayonnement solaire journée pour la localité de N'goussa, ou l'on note que le rayonnement moyen varie entre 800 Wh/m² et 1000 Wh/m², ce qui correspond à une augmentation de la température allant jusqu'à 50 c°, signifie qu'il ya un fort rayonnement solaire surtout en saison d'été.

3.1 Modèle de profil de charge électrique

Nous utilisons comme donnée principale pour la problématique développée dans ce travail le profil de charge électrique qui correspond à la consommation électrique mensuelle en été et en hiver. Les deux mois choisie juillet et décembre et ceci pour des raisons de disponibilité des données au niveau de l'entreprise nationale Sonelgaz. C'est le mois de juillet connus dans la localité choisie comme mois de grande consommation énergétique.

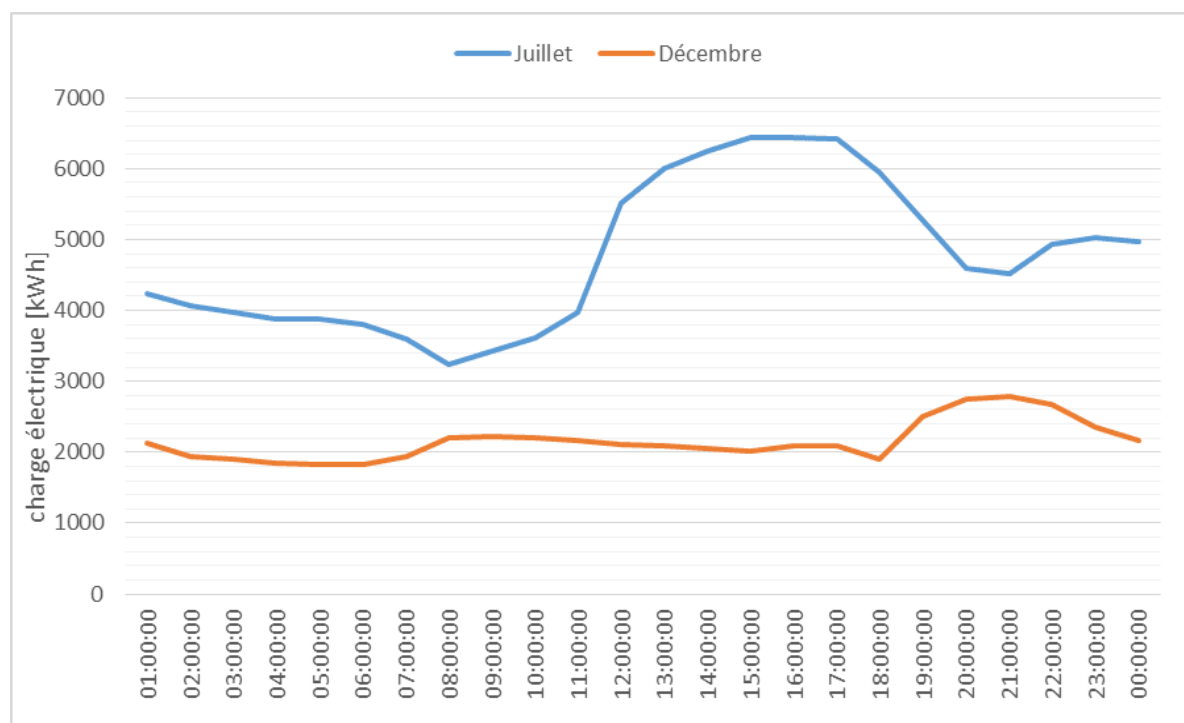


Figure 3.3 : les profile de charge électrique (KWh) liée à la consommation horaire de l'électricité Pour les deux mois (juillet, décembre)

La figure représente deux profils de charge électrique lié à la consommation horaire de l'électricité pour la localité de N'goussa. La première charge qui est représenté le mois de juillet. La consommation énergétique varie de 3,2 MWh à 6,00 MWh correspondants respectivement aux horaires de fonctionnement 8 heures et 16 heures. Une charge électrique moyenne est calculée sur la base du profil de charge électrique est évaluée à 4,620 MWh. Une plage de consommation maximale aux heures de pointe [12-17 h] est liée à une grande demande énergétique due aux conditions environnementales de la région pendant cette saison d'été. La deuxième charge est représentée le mois de décembre. La consommation énergétique varie de 1,9 MWh à 2,787 MWh correspondants respectivement aux horaires de fonctionnement 18 heures et 21 heures. Une charge électrique moyenne est calculée sur la base du profil de charge électrique est évaluée à 2,3 MWh. Une plage de consommation maximale aux heures de pointe [19-21 h] est liée à une grande demande énergétique due aux conditions environnementales de la région pendant cette saison d'hiver.

Basé sur cette courbe de charge de notre cas d'étude ; dans les moments où la consommation est inférieure à la production, il existe donc un excès d'énergie, qui est ensuite utilisé, stocké et récupéré quand la consommation est importante aux heures de pointe. Nous proposons une solution à ce problème, l'injection d'hybridation et l'hydrogène en tant que vecteur énergétique, utilisé dans le système de stockage / déstockage de l'énergie électrique en fonction de la technologie de (électrolyseur, pile à combustible).

3.3 Caractérisation technique des sous-systèmes

Le module de PV que nous avons utilisé est de type « TSM-PD-265W », les spécifications technique sont présentée dans le table 3.1 .Les principales caractéristique de ce module PV « TSM » sont la puissance maximale qui est 265 W, le nombre des cellules qui est 60, la tension de puissance maximal qui 30,8 V, la t'intensité de son courant qui est 8,61A et l'efficacité du module PV est 16,2%.

Table 3.1 : Spécifications du module PV (TSM-PD 265W)

Puissance maximale, Pmax	W	265
Tension de Pmax, Vmp	(V)	30,8
Courant de Pmax, Imp	(A)	8,61
Courant de court-circuit, Isc	(A)	9,10
Tension de circuit-ouvert, Vco	(V)	38,3
Coefficient de température en circuitouvert Voc, Kv	%/°C	- 0,32
Coefficient de température en courtcircuit Isc,	%/°C	0,05
Nombre de cellules		60
Efficacité du module η_m %	%	16,2

L'électrolyseur que nous avons utilisé est de type PEM « Giner INC » [59]. Les spécifications techniques sont présentées dans **la table 3.2**. Les principales caractéristiques de l'électrolyseur PEM sont la puissance consommée au débit de production maximal qui est de 46 kW, le nombre des cellules connectées en série 60, la production maximum est de H₂ 10 Nm⁻³.h⁻¹, la production maximale d'O₂ est 5 Nm⁻³.h⁻¹ et la surface active de la cellule est de 290 cm².

Table 3.2 : Spécifications techniques de l'électrolyseur PEM [59]

Fabricant de piles	Giner INC	Surface active de la cellule	290 cm ²
Température	20-60 ° C	Anode et pression cathodique	1-35 bar
production maximum de H ₂	10 Nm ⁻³ .h ⁻¹	Pompe max. élec. puissance contre.	1,1 KW
Production maximale d'O ₂	5 Nm ³ .h ⁻¹	Efficacité électrique pompe moteur	0,75
Puissance consommée au débit de production maximal	46 kW	Débit de la pompe	140 l min ⁻¹
Cellules connectées en série	60	Pression de pompe totale	2 bar

Les paramètres de fonctionnement du système pile à combustible à membrane échangeuse de protons « PEM » sont présentés dans le table 3.3, en l'occurrence les spécifications techniques de pile à combustible PEM [60]. Les principales caractéristiques sont la température absolue est 343 K, tension de charge (E_0) 1,229 V et le nombre de cellules (N_0) 712.

Table 3.3 : Spécifications techniques de pile à combustible PEM [60]

Tension d'activation (B)	0,04777 A ⁻¹	Constante de temps de l'oxygène (τ_{O_2})	6,74 s
Constante de Tension d'activation (B)	0,0136 V	Constante de valve à oxygène (K_{O_2})	2,11×10 ⁻⁵ k mol/s.atm
Constante de Faraday(F)	964846 cmol ⁻¹	Résistance interne (R int)	0,00303 Ω
Constante de temps de l'hydrogène (τ_{H_2})	3,37 s	Température absolue (T)	343 K
Constante de valve à hydrogène (K_{H_2})	4,22×10 ⁻⁶	Constante de gaz universelle (R)	8,314 [J/ mol. K]
Constante de Kr	1,8449×10 ⁻⁶	Facteur d'utilisation (U)	0,8
Tension de charge initiale (E_0)	1,229 V	Constante de temps de l'eau (τ_{O_2})	18,418 s
Nombre de cellules (N_0)	712	Constante de vanne d'eau (K H ₂ O)	7,716×10 ⁻⁶ k mol/s.atm

3.4 Modélisation du système hybride

Pour les systèmes d'électrolyse considérés dans les études en cours, les performances et les caractéristiques d'un électrolyseur PEM ont été utilisées. Semblable à la pile à combustible, son modèle de performances est le suivant :

3.4.1 Modélisation de photovoltaïque

Dans ce travail, le modèle de simulation est utilisé pour apprécier les performances du système PV. Le rayonnement solaire utilisé pour la zone étudiée située à 29 °10 N de latitude

et 30°52'N de longitude. l'équation (3.1) a été utilisée pour estimer la puissance générée des panneaux PV [61].

$$P_{pv} = (P_{rated} N_{pv} Df) \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) (1 + K_T (T_c - T_{ref})) \quad (3.1)$$

Où $K_T = -3,5 \times 10^{-3}$ (1/°C) pour poly cristallin et mono Silicium [62]. Concernant la régularité énergétique, il a été proposé que T_c (la température de la cellule) soit estimé comme dans l'équation. (3.2) :

$$T_c = T_{amb} + G \left(\frac{\tau \alpha}{U_l} \right) \quad (3.2)$$

Le coefficient de perte de chaleur, $\frac{\tau \alpha}{U_l}$, peut être exprimé comme [63]

$$\frac{\tau \alpha}{U_l} = \frac{NOCT - 20}{0.8} \quad (3.3)$$

La caractéristique I-V de ce module est représentée par les équations suivantes :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \frac{q(V + R_{sh}I)}{\alpha K T N_s} - 1 \right) - \frac{(V + R_{sh}I)}{R_{sh}} \quad (3.4)$$

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_i(T - 298.15)) \frac{G}{1000} \quad (3.5)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc} + K_i(T - 298.15)}{\exp \left(\frac{q(V_{oc} + K_v(T - 298.15))}{\alpha K T N_s} \right) - 1} \quad (3.6)$$

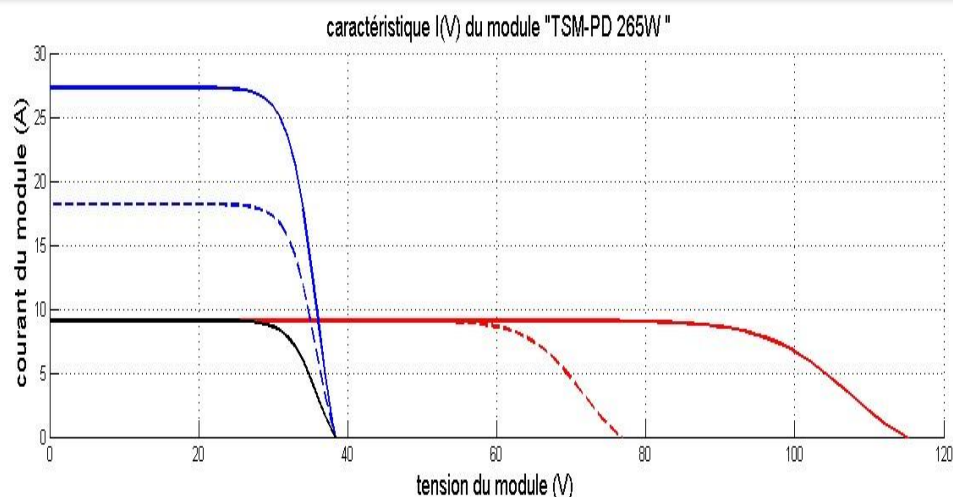


Figure3.4 : La valeur de courant (A) et tension (V) du module Pv

La figure 3.4 représente le courant du module TSM-PD en (A) est fonction de la tension en (V) .Les calculs théoriques sont pratiquement appliqués sur le module PV Yingli Solar de type TSMPD 265w avec une puissance de sortie de 265W. Le diagramme courant-tension (I-V) de ce type de modules PV est donné sur la Figure. Sur cette figure, on peut avoir qu'un moment différent intensités de rayonnement solaire, il n'existe qu'un un seul point du diagramme I-V pour lequel le produit VI a une valeur maximale. Plus exactement, pour chaque courbe n'existe qu'un seul point de fonctionnement (nommé Maximal Power Point - MPP), ensuite, on peut avoir que un moment régulier intensité, il existe qu'un 3 point du le mm diagramme dans lequel le PV convertit l'électricité de la tension continue en tension alternative si le PVP sera connecté sur un réseau. Pour ce faire, un groupe de chaînes est connecté sur un ou plusieurs onduleurs DC / AC.

3.4.2 Modélisation de l'électrolyseur

les équations mathématiques utilisées pour calculer la quantité d'hydrogène produite par l'électrolyseur utilisé dans la configuration proposée dans la problématique sont [64] .Débit molaire d'eau consommé par l'électrolyseur exprimé en [mol/s]

$$\dot{n}_{H_2O} = \frac{n_c I_{ele}}{2F} \quad (3.7)$$

- a. Débit molaire d'hydrogène produise par l'électrolyseur exprimé en [mol/s]

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{n_c I_{ele}}{2F} n_f \quad (3.8)$$

- b. Débit molaire d'oxygène produit par l'électrolyseur exprimé en [mol/s]

$$\dot{n}_{O_2} = \frac{n_c I_{ele}}{4F} n_f \quad (3.9)$$

- c. L'efficacité de Faraday

$$\eta_F = 96,5 \exp\left(\frac{0,09}{I_{ele}} - \frac{75,5}{I_{ele}^2}\right) \quad (3.10)$$

Où :

N_c : Nombre de cellules d'électrolyseur (connectées en série)

I : Courant électrique exprimé en A

F : Constante de Faraday (96485 C mol⁻¹)

3.4.3 Modélisation du compresseur

Le compresseur est un sous-système utile lorsque pour un projet, la place attribuée au stockage de gaz est limitée. On choisit alors de compresser les gaz (en augmentant la pression) bien que cela engendre une consommation d'énergie supplémentaire. Le compresseur est placé entre l'électrolyseur et les réservoirs. Il comprime les gaz en sortie de l'électrolyseur, et les envoie dans les réservoirs à la pression souhaitée. La puissance consommée par le compresseur est modélisée de façon classique par la relation suivante [65][[66] [67]:

$$P_{Com-Gaz} = \frac{T_{In} C_p (gaz)}{\eta_{c-1}} \left(\left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \dot{m}_{Gaz} \quad (3.11)$$

$P_{Com-Gaz}$: Puissance consommée par le compresseur pour le gaz choisi (hydrogène ou oxygène) (W)

T_{In} : Température à l'entrée du compresseur, ce qui correspond à la température à la sortie de l'électrolyseur (K)

$C_p(gaz)$: Capacité massique du gaz (hydrogène ou oxygène) à pression constante pour la température T_{In} (J.kg⁻¹.K⁻¹)

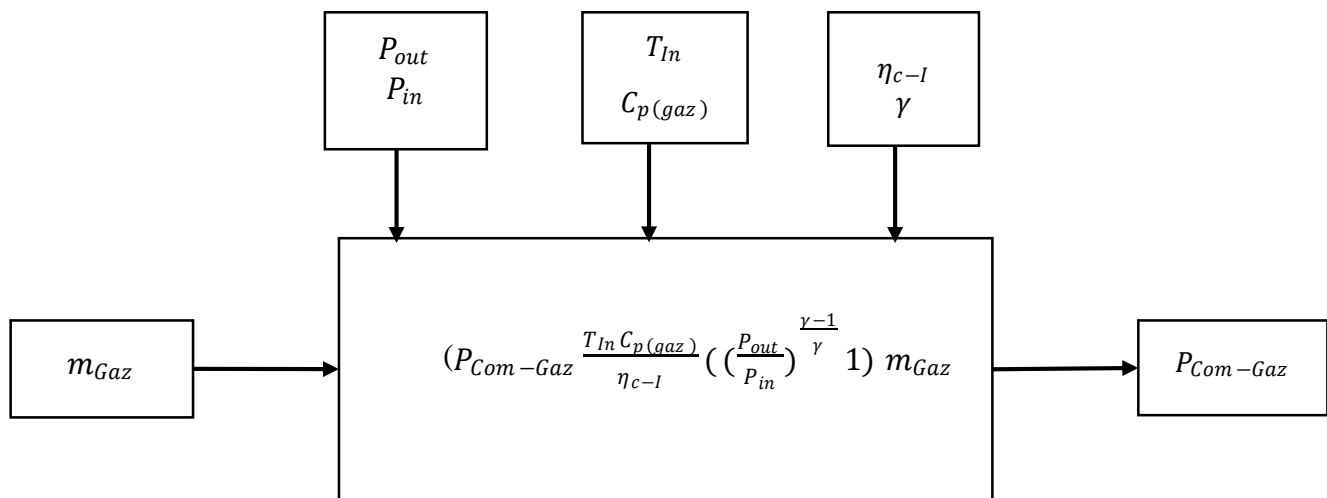
η_{c-I} : Rendement isentropique du compresseur (%)

P_{out} : Pression en sortie du compresseur, ce qui correspond à la pression dans le stockage (bar)

P_{in} : Pression en entrée du compresseur, ce qui correspond à la pression à la sortie de l'électrolyseur (bar)

γ : Rapport isentropique (CP/CV) du gaz considéré (-)

m_{Gaz} : Débit massique de gaz comprimé (kg.s⁻¹) .



La figure 3.5 : résume la modélisation du compresseur [65]

3.4.4 Modélisation de la pile à combustible

Les équations mathématiques utilisées pour calculer la production de l'électricité produite suite au fonctionnement de la pile à combustible :

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{I_{PAC}}{4F} \quad (3.12)$$

$$\dot{n}_{O_2} = \frac{I_{PAC}}{2F} \quad (3.13)$$

a. Les différentes pressions partielles peuvent être données comme suit [68]:

$$P_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{\tau_{H_2} \times s + 1} \times (m_{H_2}^{in} - 2 \times I_{PAC} \times Kr) \quad (3.14)$$

$$P_{O_2} = \frac{1/K_{O_2}}{\tau_{O_2} \times s + 1} \times (m_{O_2}^{in} - I_{PAC} \times Kr) \quad (3.15)$$

$$P_{H_2O} = \frac{1/K_{H_2O}}{\tau_{H_2O} \times s + 1} \times (2 \times I_{PAC} \times Kr) \quad (3.16)$$

a. Le potentiel thermodynamique E est donné par[69]:

$$E = 1,229 - 0,85 \cdot 10^{-3} (T - 298,15) + 4,3085 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot (\log(P_{H_2} + 0,5 \cdot \log P_{O_2})) \quad (3.17)$$

b. La perte de tension ohmique dans la pile à combustible est donnée par[70] :

$$N_{ohm} = I_{PAC} \times R_{int} \quad (3.18)$$

c. la résistance d'activation est donnée comme[70]:

$$N_{act} = B \times \log(C \times I_{PAC}) \quad (3.19)$$

d. La tension de sortie de la cellule : Elle peut être déterminée à partir de l'effet combiné de thermodynamique, de transport de masse, de cinétique et de résistance ohmique [70] :

$$V_{cell} = E - N_{act} - N_{ohm} \quad (3.120)$$

e. La tension de sortie de la pile à combustible[70]:

$$V_{\text{stack}} = N_{\text{cell}} \times V_{\text{cell}} \quad (3.21)$$

f. La puissance de la pile à combustible: est fonction du courant et de la tension :

$$-P = V_{\text{stack}} \times I_{PAC} \quad (3.22)$$

3.5 Algorithme de processus du calcul (gestion d'énergie)

Après avoir défini les fonctions objectives et la stratégie de gestion de l'énergie sur la base du modèle de performance proposé, la stratégie d'optimisation est définie à la figure 23 et est mise en œuvre à l'aide d'un algorithme. Le modèle d'optimisation pour le système à grille à hydrogène est développé dans Matlab.et comprend deux parties. La première partie est basée sur le cycle de simulation du système, défini par la stratégie de gestion de l'énergie en fonction du modèle de performance de chacun des sous-systèmes. Cependant, la deuxième partie recherche la valeur optimale des paramètres optimisés, en remplissant toutes les fonctions objectives. En entrée du code d'optimisation.

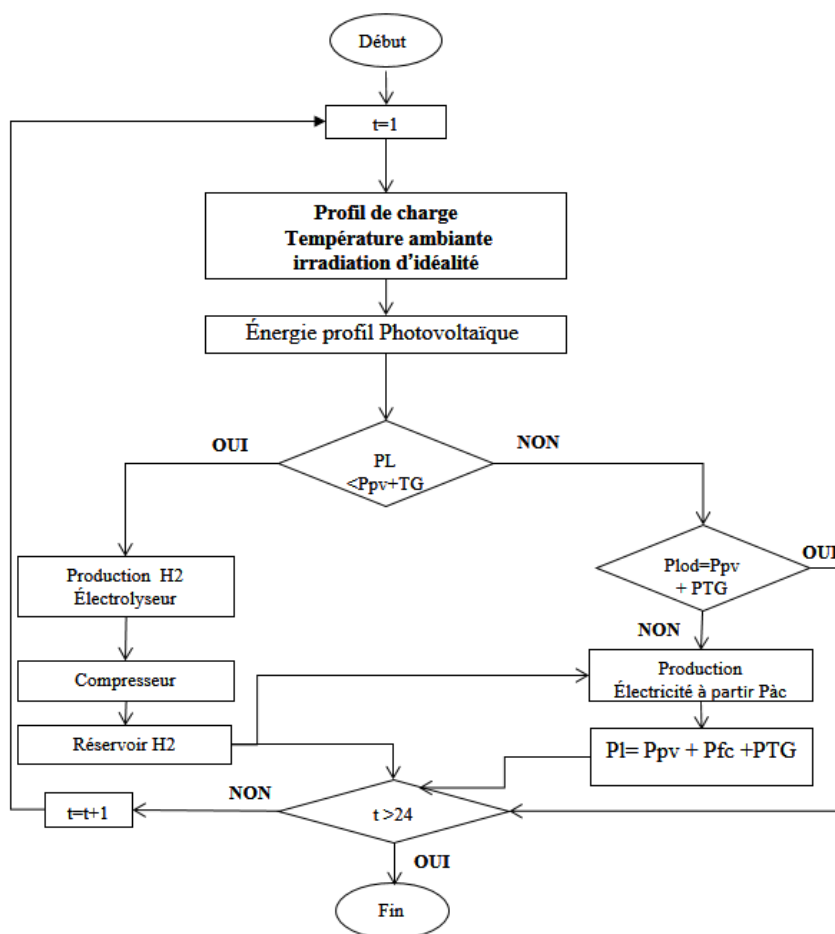


Figure 3.6 : Organigramme du système hybride (réseau, photovoltaïque) à base hydrogène.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude de N'goussa et les caractérisations techniques du sous-système de photovoltaïque, l'électrolyseur PEM et de pile à combustible PEM et les modélisations mathématiques ont été utilisées pour du système, grâce au programme matlab la simulation numérique par l'algorithme ont été obtenus suggérer ci-dessus.

Chapitre 4 :

Résultats et discussions

4.1 Introduction

Nous avons appliqué l'algorithme de calcul au système énergétique proposé composé de champ photovoltaïque, l'électrolyseur, de la pile à combustible et des organes auxiliaires. Nous présentons ensuite les résultats obtenus pour chaque sous-système du processus technologique de stockage et déstockage d'hydrogène. Ce chapitre présenter les résultats relatifs à la modélisation du système choisi composé d'un photovoltaïque (PV), électrolyseur type PEM « Giner INC », d'une pile à combustible PEM, d'un réservoir et d'un compresseur. La procédure de résolution et la présentation des résultats et discussions Et sous termine par étude techno-économique pour sous-système.

4.2 Résultats et discussions

Dans cette partie du travail, nous avons appliqué l'algorithme de calcul au système hybride proposé composé de l'électrolyseur, de la pile à combustible et des organes auxiliaires. Nous présentons ensuite les résultats obtenus pour chaque sous-système du processus technologique de stockage et déstockage d'hydrogène. Nous utilisons comme donnée principale le profil de charge exprimé en courant électrique qui est directement proportionnel à la consommation énergétique de la région concernée. Nous allons d'abord déterminer l'évaluation de la production d'électricité de la production photovoltaïque optimal qui sera délivré par le système hybride et qui est calculé en égalant la quantité d'énergie électrique pour les deux périodes de stockage (la consommation est inférieure à l'alimentation par le réseau électrique) / déstockage (la consommation est supérieure au niveau de l'alimentation de SONELGAZ) d'hydrogène. Ce bilan nous permet de déterminer exactement le niveau d'alimentation de l'énergie électrique assurée par l'opérateur énergétique, en l'occurrence SONELGAZ, et ceci en tenant compte des différents rendements de conversion énergétique de chaque sous-système (électrolyseur, pile à combustible et compresseur).

4.2.1 Effet des données climatique sur la production d'électricité cas de juillet :

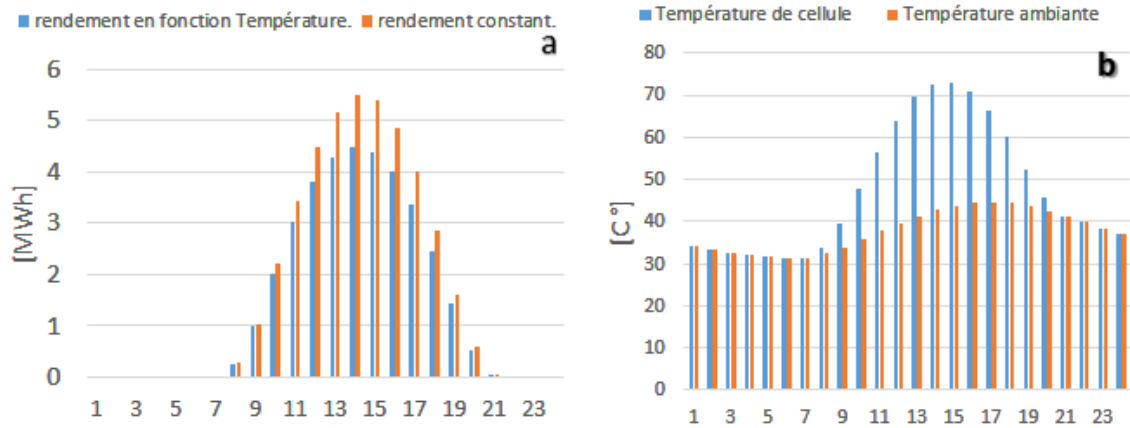


Figure 4.1 : cas de juillet (a) : Evaluation de la production horaire de l'électricité photovoltaïque (b) : Comparaison entre température ambiante (Temp) et température de cellule du PV

La figure 4.1 représente évaluation de la production horaire d'électricité de la production photovoltaïque et la comparaison entre température ambiante et de cellule PV dans la région de N'gouss, pendant le mois de juillet. On remarque que la production d'électricité par photovoltaïque diminue et atteint 4.5 MWh, en raison de la température élevée en été, qui varie de 0 C° à 70C°, ce qui signifie que la quantité d'électricité produite est affectée par la température en le mois de juillet.

4.2.2 Production totale/ consommation d'énergie électrique

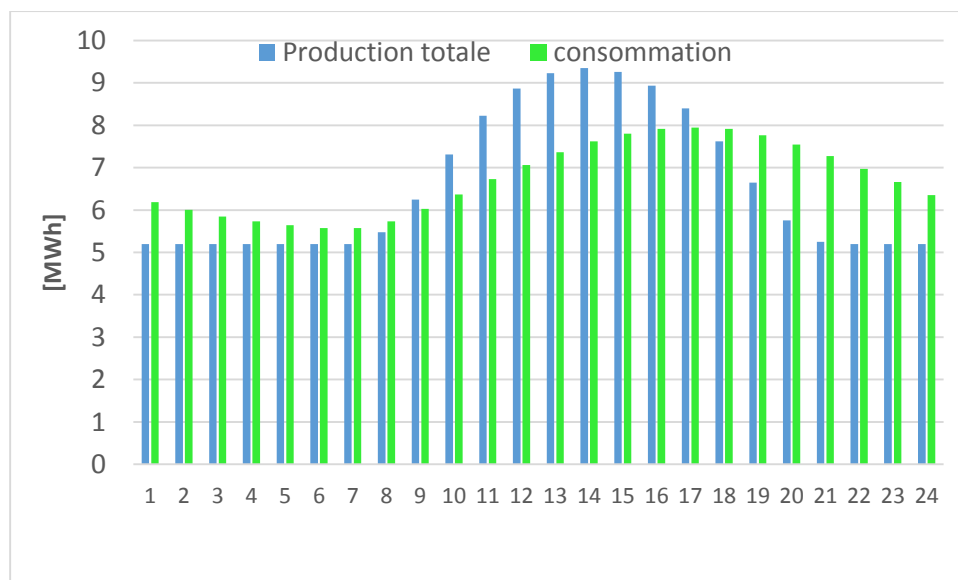


Figure 4.2 Evolution de la production totale et la consommation de l'électricité dans le mois Juillet

La figure 4.2 représente l'évolution de la production totale et la consommation de l'électricité pendant le mois de juillet. On constate que la consommation d'énergie électrique n'est pas uniforme pendant 24 heures en juillet, car la courbe est divisée en deux périodes. La première période de (1-8 h) et (18-24 h) la consommation est supérieure à la production par rapport à l'énergie fournie par sonelgaz. Dans la deuxième période de (09-17 h) la production totale est supérieure à la consommation car c'est en saison été. Où l'on constate que la plus grande valeur de la consommation est le soir. La production totale est la plus grande valeur pendant la sieste. Car la production total maximal à 14 h avec une valeur dépassée 9 MWh par a rapport consommation maximal à 17h avec une valeur 8MWh.

Par conséquent, nous devons stocker l'excès d'énergie pendant la sieste, pour l'utiliser quand nous en avons besoin.

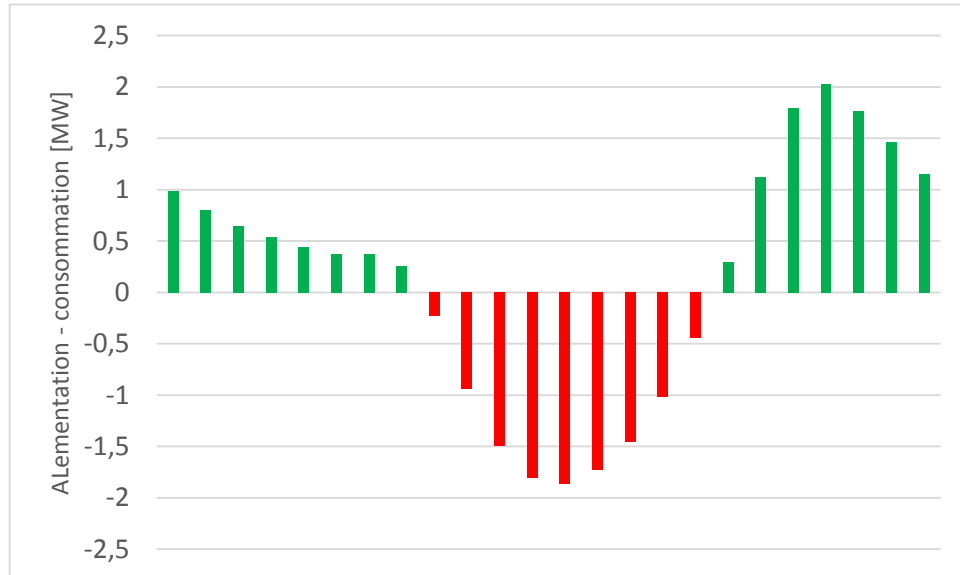


Figure 4.3: Evolution des périodes de production d'hydrogène et d'électricité dans le mois de Juillet

La figure 4.3 représente l'évolution des périodes de production d'hydrogène et d'électricité de mois de juillet , pour fixer le niveau de production optimal, il devrait y avoir une égalité de

quantités d'énergie dans les deux périodes, mais la grandeur physique n'est pas en même unité, pour cela et après soustraction des pertes d'énergie dans le processus de stockage de l'hydrogène.

4.2.3 Production et stockage d'hydrogène (fonctionnement de l'électrolyseur)

La quantité de l'énergie équivalente à la quantité d'hydrogène stocké dans le réservoir, il faut calculer la quantité l'hydrogène produit à la sortie de l'électrolyseur et l'énergie électrique consommée par le compresseur pour stocker de l'hydrogène sous forme de gaz à haute pression.

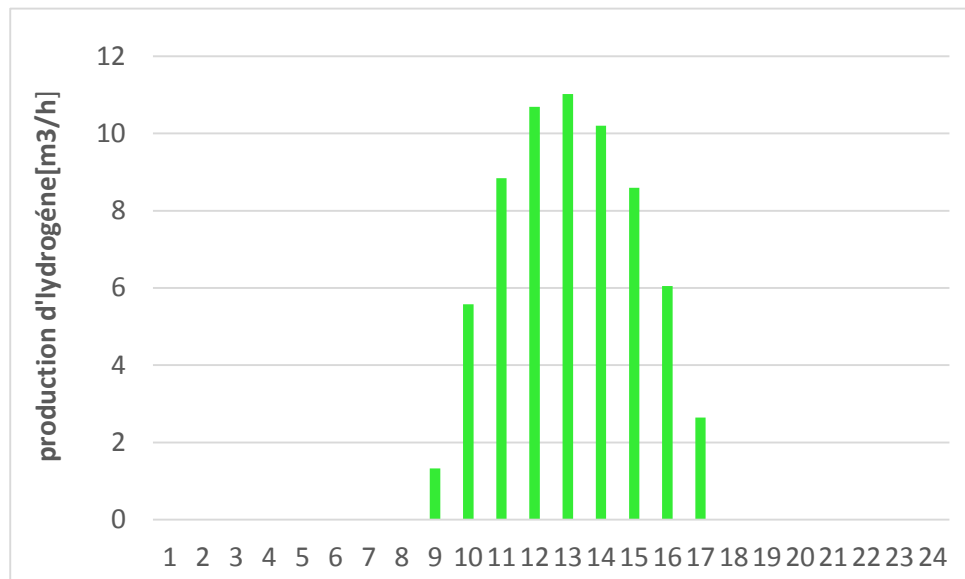


Figure 4.4: la variation temporelle de la production d'hydrogène à la sortie de l'électrolyseur pendant le mois juillet [$\text{N m}^3 / \text{h}$].

La figure 4.4 montre que l'électrolyseur marché dans le mois de juillet une plage du 9h et la production maximale à 13 h avec une valeur dépassée $10 \text{ N m}^3 / \text{h}$, cette production d'hydrogène due aux conditions environnementales de la région pendant cette saison été.

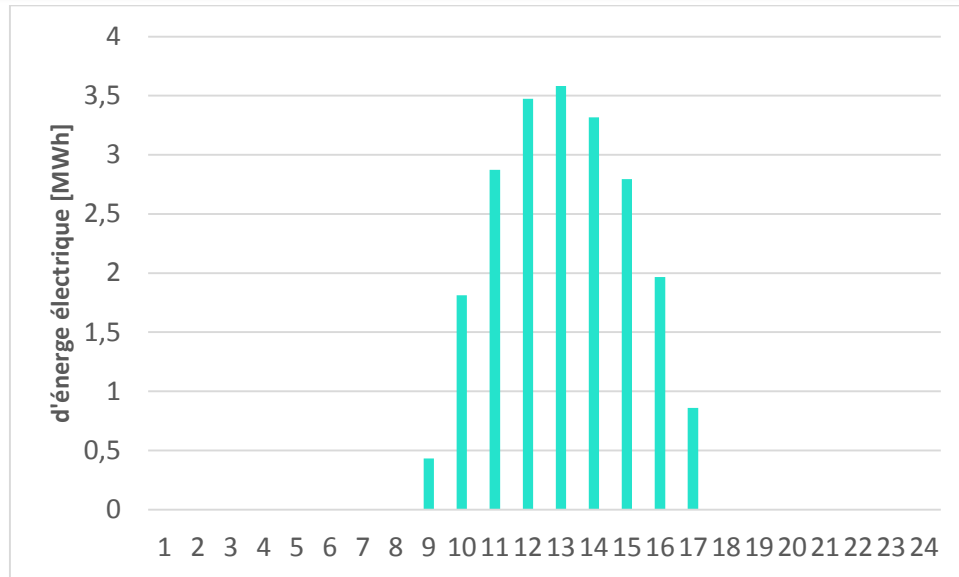


Figure 4.5 : Evolution du fonctionnement du compresseur

La figure 4.5 représente la variation de la production d'hydrogène et la puissance du compresseur pendant le mois de juillet respectivement en fonction de temps, ceci correspond aux heures où le niveau de la production est supérieur au niveau de la consommation, ce qui signifie qu'il y a un excès d'énergie électrique fourni par l'opérateur. La production maximal de compresseur à 13h avec une valeur dépassée 3.5MWh.

4.2.4 Effet des données climatique sur la production d'électricité cas de décembre

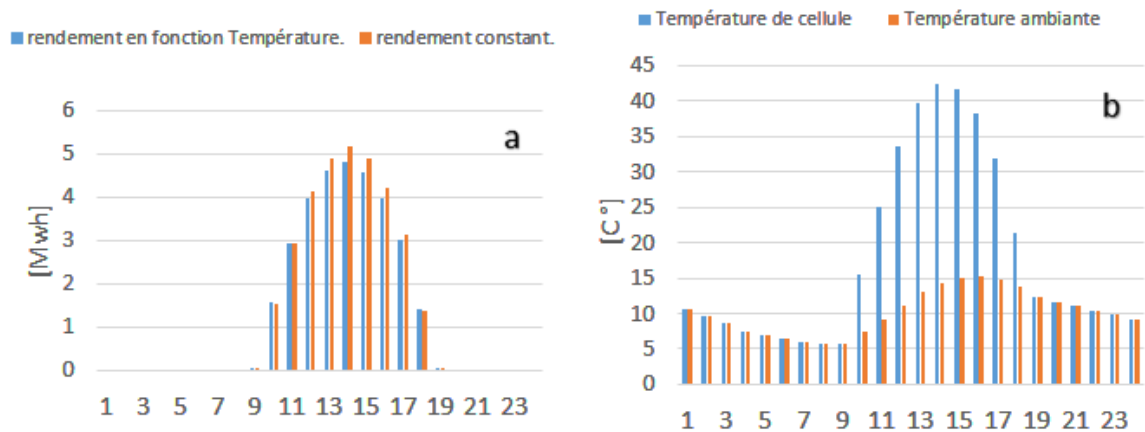


Figure 4.6 : cas d'étude Décembre (a) : Evaluation de la production horaire de l'électricité photovoltaïque (b) : Comparaison entre température ambiante (Temp) et température de cellule du PV

La figure 4.6 représente l'évaluation de la production horaire d'électricité de la production photovoltaïque et la comparaison entre température ambiante et de cellule PV dans la région de N'goussa, pendant le mois de décembre. On a remarqué que la production photovoltaïque en décembre est élevée et atteint 5 MWh. C'est lorsque le rendement est constant, ce qui signifie que la température n'affecte pas la production.

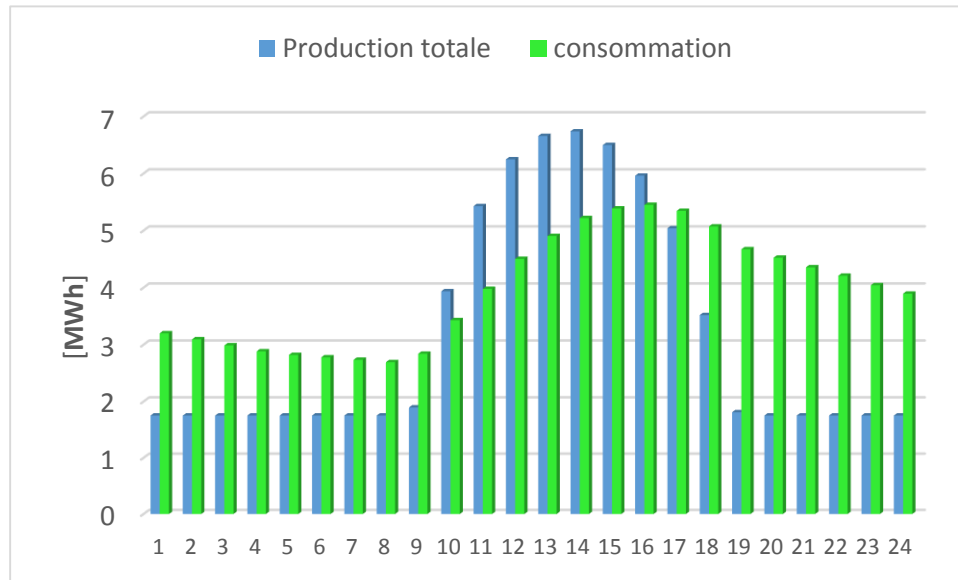


Figure 4.7 : Evolution de la production totale et la consommation de l'électricité dans le mois décembre

La figure 4.7 représente l'évolution de la production totale et la consommation de l'électricité pendant le mois de décembre. On constate que la consommation d'énergie électrique n'est pas uniforme pendant 24 heures en décembre, car la courbe est divisée en deux périodes. La première période de (1-9 h) et (17-24 h) la consommation est supérieure à la production par rapport à l'énergie fournie par SONELGAZ. Dans la deuxième période de (11-16 h) la production totale est supérieure à la consommation car c'est en saison d'hiver. Où l'on constate que la plus grande valeur de la consommation est le soir. La production totale est la plus grande valeur pendant la sieste, car la production total maximal à 14 h avec une valeur dépassée 6 MWh par rapport la consommation maximal à 16h avec une valeur dépassé 5 MWh.

Par conséquent, nous devons stocker l'excès d'énergie pendant la sieste, pour l'utiliser quand nous en avons besoin.

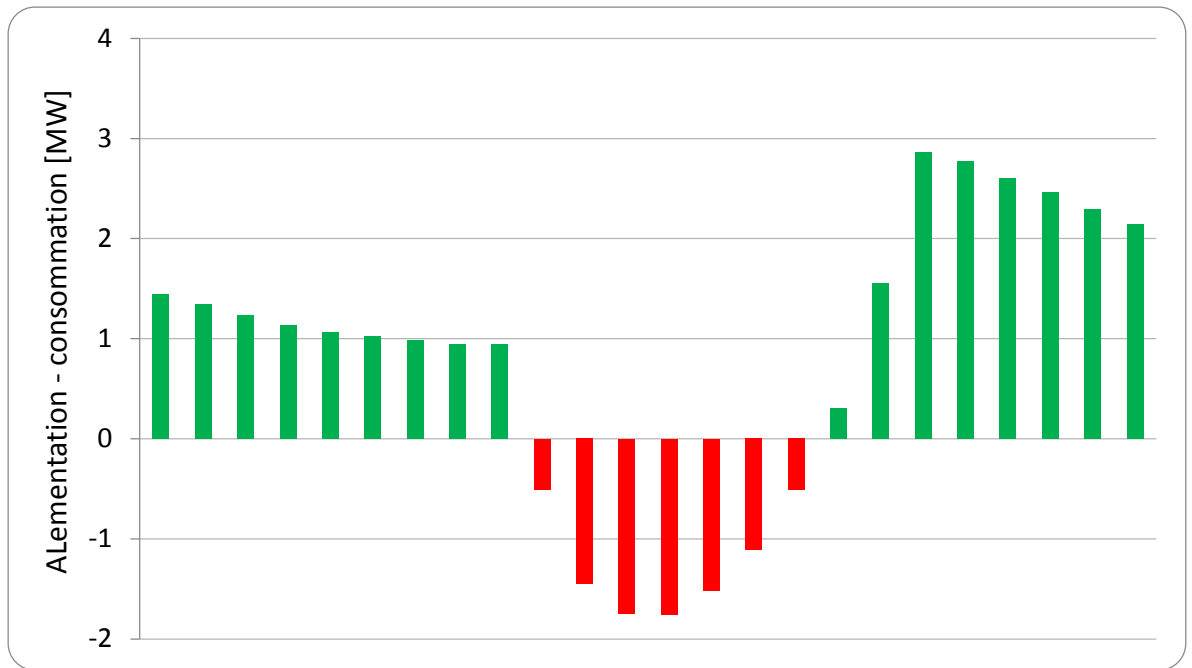


Figure 4.8: Evolution des périodes de production d'hydrogène et d'électricité dans le mois de décembre

La figure 4.8 représente l'évolution des périodes de production d'hydrogène et d'électricité de mis de décembre , pour fixer le niveau de production optimal, il devrait y avoir une égalité de quantités d'énergie dans les deux périodes, mais la grandeur physique n'est pas en même unité, pour cela et après soustraction des pertes d'énergie dans le processus de stockage de l'hydrogène

(efficacité de l'électrolyseur et puissance de compresseur). Il convient d'estimer la quantité d'énergie équivalente à la quantité d'hydrogène produite. L'égalité de l'énergie électrique équivalente à la quantité de l'hydrogène stocké dans le réservoir et d'électricité produit au niveau de la pile à combustible, nous permet d'écrire l'équation suivante :

$$E_{eq} = (I_{elec} \times U_{Res} \times \eta_{elec} \times HHV \times \dot{m}_{H_2}) - W_c \quad (4.1)$$

E_{eq} Energie électrique équivalente à la quantité de l'hydrogène

I_{elec} Courant électrique passé dans électrolyseur

U_{Res} Tension électrique du l'électrolyseur

η_{elec}	Rendement de l'électrolyseur
HHV	Pouvoir calorifique supérieur d'hydrogène
\dot{m}_{H_2}	Débit massique sortant à électrolyseur

4.2.5 Production et stockage d'hydrogène (fonctionnement de l'électrolyseur) pendant le mois de décembre

Afin d'estimer la quantité de l'énergie équivalente à la quantité d'hydrogène stocké dans le réservoir, il faut calculer la quantité l'hydrogène produit à la sortie de l'électrolyseur et l'énergie électrique consommée par le compresseur pour stocker de l'hydrogène sous forme de gaz à haute pression. Cette figure montre que l'électrolyseur marché dans le mois de d'une décembre plage du 7h et la production maximal à (12-13) h avec une valeur dépassée 10 $N m^3 /h$,

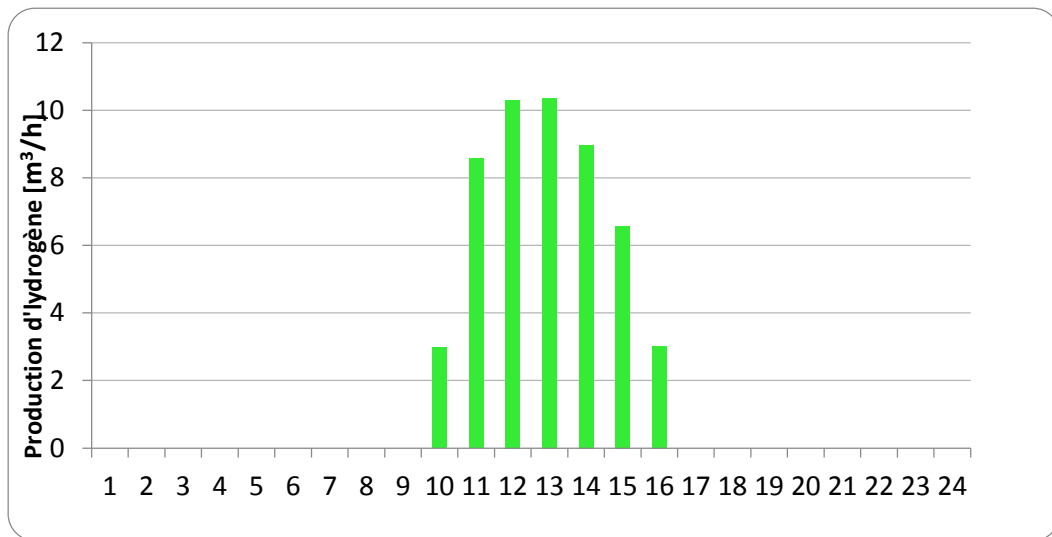


Figure 4.9 : la variation temporelle de la production d'hydrogène à la sortie de l'électrolyseur pendant les mois de décembre [$N m^3 /h$].

La figure4.10 représente la variation de la production d'hydrogène et la puissance du compresseur pendant le mois de décembre respectivement en fonction de temps, ceci correspond aux heures où le niveau de la production est supérieur au niveau de la consommation, ce qui signifie qu'il y a un excès d'énergie électrique fourni par l'opérateur.

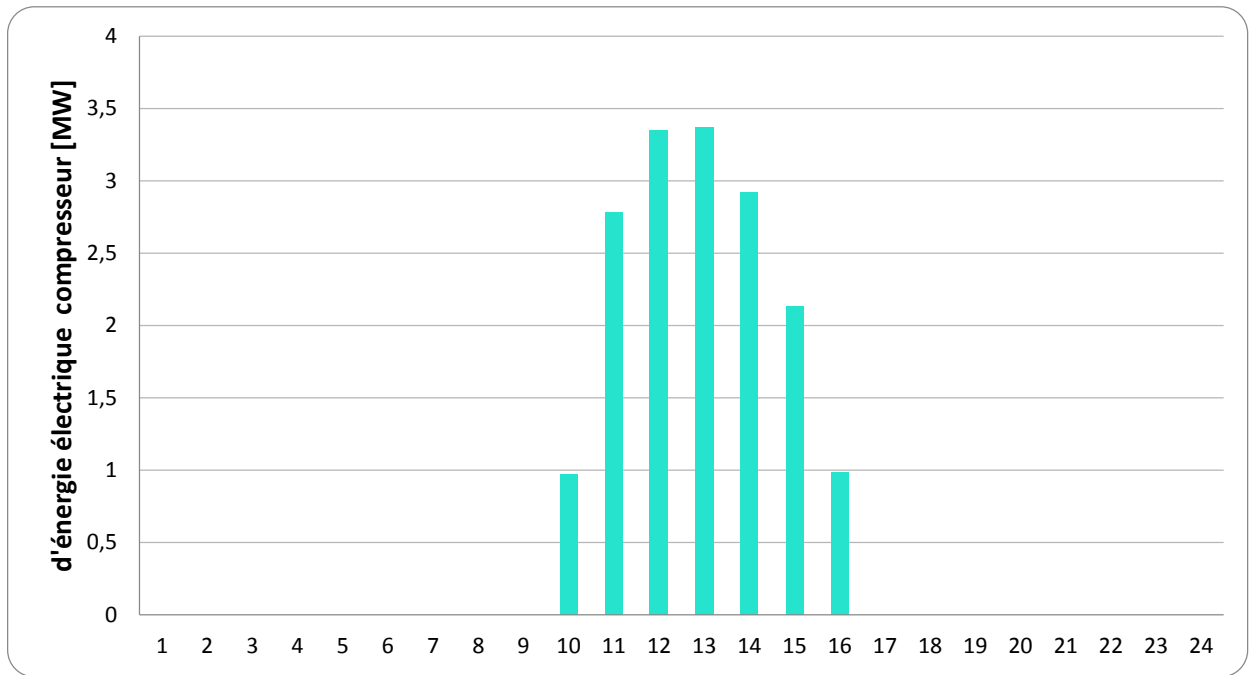


Figure 4.10 : Evolution du fonctionnement du compresseur (décembre)

4.1 Conclusion

Ce chapitre, nous présentons les résultats de la simulation numérique de l'algorithme ont été proposés dans l'étude du système d'hybridation, la production d'électricité de photovoltaïque et sa relation avec la température de cellule PV et le rendement constant, sous termine par la production de électricité en fonction de l'électrolyseur et la pile combustible.

Conclusion Générale

Notre avenir énergétique doit être basé sur des énergies non polluantes ayant des ressources importantes. Les énergies renouvelables sont les meilleurs candidats mais l'intermittent de leur production nécessite de trouver des moyens de stockage efficaces et respectant l'environnement. Une hybridation de système électrolyseur / pile à combustible permet de stocker de l'électricité par l'intermédiaire d'un stockage sous forme d'hydrogène.

Ce système d'énergie basée sur l'hydrogène est proposé comme solution dans des réseaux autonome de génération d'énergie pour maîtriser les variations à la fois du niveau de production de l'opérateur de hybridation et la consommation d'une localité donnée, en l'occurrence celle de la ville N'goussa.

Le sujet de ce travail est de mettre en évidence les méthodes et le stockage de la nouvelle électricité utilisant de l'hydrogène. Une économie de l'hydrogène reposerait sur deux processus électrolytiques associés à de fortes pertes d'énergie : l'électrolyse et les piles à combustible. De plus, entre la conversion d'électricité en hydrogène par électrolyse et la reconversion de l'hydrogène en électricité par les piles à combustible, le gaz vecteur d'énergie doit être conditionné par compression ou liquéfaction. 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 modélisé les différents sous-systèmes intervenant dans le fonctionnement de la solution choisie pour la maîtrise de l'énergie. Nous analysons la consommation d'énergie de toutes les étapes importantes de la chaîne technologique de l'hydrogène,

Nous avons en premier lieu déterminé l'évaluation de la production horaire d'électricité de la production photovoltaïque et la comparaison entre température ambiante et de cellule PV dans la région de N'goussa, pendant les mois de décembre et juillet. Égalant la quantité d'énergie électrique pour les deux périodes de stockage (la consommation est inférieure à l'alimentation

par le réseau électrique et photovoltaïque) / déstockage (la consommation est supérieure au niveau de l'alimentation de) d'hydrogène.

L'application de l'algorithme de calcul nous a permis de retrouver les résultats des sous-systèmes hybrides suivants :

- Car la production totale maximal à 14 h avec une valeur dépassée 9 MWh par a rapport consommation maximal à 17h avec une valeur 8MWh.
- La durée de fonctionnement de l'électrolyseur y compris le compresseur est de 13 h, avec une production dépassant 10 Nm³/h pour les mois de décembre et juillet.

Références

- [1] “transition énergétique,” 2019.
- [2] N. SAIFI, “Contribution A La Conception Des Batiments A Faible Consommation D’énergie Dans Les Zones Arides,” Université Kasdi Merbah Ouargla, 2016.
- [3] C. E. Partielle, “Abdoul karim traoré gestion d’un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles juillet 2016,” 2016.
- [4] O. Gergaud and O. G. Mod, “Modélisation énergétique et optimisation économique d’un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur de l’ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE de CACHAN Spécialité : Électrotechnique Pr,” 2009.
- [5] “Comment produit-on l’électricité ?” .
- [6] B. Tissot, “Quel avenir pour les combustibles fossiles ?,” *Comptes rendus l’Académie des Sci.*, no. 12, pp. 787–796, 2001.
- [7] M. M. Mouhammad Al Anfaf, “Contribution to the modeling and optimization of multi-sources and multi-load energy,” Université de Lorraine, 2016.
- [8] A. GOUAREH, “Maîtrise et optimisation de la gestion énergétique en Algérie,” Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2017.
- [9] F. K. Manasse, “Comparison of costs for solar electric sources with diesel generators in remote locations,” *Rev. Phys. Appliquée*, vol. 15, no. 3, pp. 369–376, 1980, doi: 10.1051/rphysap:01980001503036900.
- [10] B. Multon, “l’énergie électrique: analyse des ressources et de la production,” 2012.
- [11] A. Simon, A. Simon, J. Sainte-mare, M. Schatz, and A. White, “Modélisation et simulation des films liquides dans les turbines à vapeur To cite this version : Thèse Modélisation et simulation des films liquides dans les turbines,” 2017.
- [12] M. Giraud and J. Silet, “Turbines à gaz aéronautiques et terrestres,” *Tech. l’Ingénieur*, pp. 1–39.
- [13] L. Voltaire, “LACQ – Département des Pyrénées Atlantiques Dossier Demande d’Autorisation d’Exploiter Document II : Résumé non technique,” 2013.
- [14] “Giotermie, principe et fonctionnement,” 2020. .
- [15] A. R. Bhatti, Z. Salam, and R. H. Ashique, “Electric Vehicle Charging Using Photovoltaic based Microgrid for Remote Islands,” *Energy Procedia*, vol. 103, pp. 213–218, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2016.11.275.
- [16] connaissance des énergies, “Hydroélectricité,” 2011. .
- [17] R. Bakhta, “Etude prospective de la récupération d’énergie en Algérie Remerciements,” 2017.
- [18] M. Arkoub and R. Alkama, “L’énergie solaire électrique: grands projets et perspectives,” *Rev. des Energies Renouvelables*, vol. 12, pp. 4–641, 2009.
- [19] L’élémentarium, “Gaz naturel.” .
- [20] G. Dellinger, “Etude expérimentale et optimisation des performances hydrauliques

des vis d'Archimède utilisées dans les micro centrales hydroélectriques,” Université de Strasbourg, 2015.

- [21] N. Gazbour, “Intégration systémique de l'éco-conception dès la phase de R&D des technologies photovoltaïques,” Université Grenoble Alpes, 2019.
- [22] L. Stoyanov, “Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables Ludmil Stoyanov To cite this version : HAL Id : tel-00653412 Mention : Energétique Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvel,” 2011.
- [23] L. Bridier, “Modélisation et optimisation d'un système de stockage couplé à une production électrique renouvelable intermittente.” 2016.
- [24] C. Armenta-Deu, “Improving photovoltaic system sizing by using electrolyte circulation in the lead-acid batteries,” *Renew. energy*, vol. 13, no. 2, pp. 215–225, 1998.
- [25] J. Aubry, “Optimisation du dimensionnement d'une chaîne de conversion électrique directe incluant un système de lissage de production par supercondensateurs: application au houlogénérateur SEAREV.” 2011.
- [26] J. Bransier, “Stockage périodique par chaleur latente aspects fondamentaux liés a la cinétique des transferts,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 22, no. 6, pp. 875–883, 1979.
- [27] C. Cadile, “Modélisation DEM et approche expérimentale de la dynamique d'un système réactif en lit fluidisé dense: application à la gazéification de la biomasse.” Aix-Marseille, 2014.
- [28] N. Calvet *et al.*, “Matériau de stockage thermique par chaleur sensible pour centrales électro-solaires testé sous flux solaire concentré,” in *Proceedings in Congres Francais de Thermique*, 2010.
- [29] J. Cicéron, A. Badel, and P. Tixador, “Stockage d'énergie par supraconducteurs et lanceur électromagnétique S3EL,” in *Symposium de Genie Electrique*, 2016.
- [30] H. Ibrahim, *Étude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé*. Université du Québec à Chicoutimi, 2010.
- [31] M. Sandali, A. Boubekri, A. Benhamza, B. Settou, D. Halassa, and D. Mennouche, “A simulation study of a solar collector using phase change materials for air heating application needs,” in *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1814, doi: 10.1063/1.4976229.
- [32] C. Savard, “Amélioration de la disponibilité opérationnelle des systèmes de stockage de l'énergie électrique multicellulaires,” Université de Lyon, 2017.
- [33] P. Tritschler, “Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergie pour un système à pile à combustible embarquée dédiée à l'application agricole.” 2010.
- [34] Ministry of Energy, “Bilan des réalisations du secteur année 2017,” 2018.
- [35] Ministère de l'Énergie, “BILAN DES REALISATIONS DU SECTEUR DE L'ENERGIE ANNEE 2018,” 2019.
- [36] D. Messaoudi, N. Settou, B. Negrou, S. Rahmouni, B. Settou, and I. Mayou, “Site selection methodology for the wind-powered hydrogen refueling station based on

- AHP-GIS in Adrar, Algeria,” in *Energy Procedia*, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.04.008.
- [37] D. Messaoudi, N. Settou, B. Negrou, and B. Settou, “GIS based multi-criteria decision making for solar hydrogen production sites selection in Algeria,” *Int. J. Hydrogen Energy*, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.10.099.
- [38] B. Settou, N. Settou, A. Gouareh, B. Negrou, C. Mokhtara, and D. Messaoudi, “GIS-Based Method for Future Prospect of Energy Supply in Algerian Road Transport Sector Using Solar Roads Technology,” *Energy Procedia*, vol. 162, pp. 221–230, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2019.04.024.
- [39] Z. Hussain, S. Memon, R. Shah, Z. A. Bhutto, and M. Aljawarneh, “Methods and Techniques of Electricity Thieving in Pakistan,” no. September, 2016, doi: 10.4236/jpee.2016.49001.
- [40] R. Kabouche and S. H. A. Talha, “Etude comparative des différentes techniques de stockage de l’ énergie solaire photovoltaïque,” *Rev. des Energies Renouvelables SIENR’12*, pp. 115–129, 2012.
- [41] S. Daoudi, “Approches théoriques pour les cellules photovoltaïques : étude des effets de substitution, du greffage et de la géométrie sur les propriétés optiques des sensibilisateurs,” Université de Lorraine ; Université de Tunis El Manar, 2020.
- [42] S. Busquet, “Etude d’un système autonome de production d’énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible: réalisation d’un banc d’essai et modélisation.” 2003.
- [43] F. Z. Zerhouni, “Adaptation Optimale d’une Charge à un Générateur Photovoltaïque’,” *Mémoire Magister, Inst. d’Electronique*, 1996.
- [44] L. G. Alves rodrigues, “Design and characterization of a three-phase current source inverter using 1.7kV SiC power devices for photovoltaic applications,” Université Grenoble Alpes, 2019.
- [45] “Series and parallel Wiring,” 2014.
- [46] D. D. E. G. Electricité and E. E. T. Automatique, “ETUDES DES CONTINGENCES DES RESEAUX DE DISTRIBUTION L’ENERGIE ELECTRIQUE,” 2018.
- [47] X. DANG, “Contribution à l’étude des systèmes Photovoltaïque / Stockage distribués. Impact de leur intégration à un réseau fragile,” 2015.
- [48] ADEME, “L’ hydrogène énergie et les piles à combustible: Feuille de route stratégique, Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Energie.,” 2011.
- [49] C. Acar and I. Dincer, “Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources,” *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.10.060.
- [50] D. Jury, “d’ énergie à base d’ hydrogène dans un réseau électrique Remerciements,” 2019.
- [51] S. Kutsaev *et al.*, “Electron accelerators for novel cargo inspection methods,” *Phys. Procedia*, vol. 90, pp. 115–125, 2017.
- [52] G. Aragón-González, A. León-Galicia, R. González-Huerta, J. M. R. Camacho, and M. Uribe-Salazar, “Hydrogen production by a {PEM} electrolyser,” *J. Phys. Conf.*

- Ser.*, vol. 582, p. 12054, Jan. 2015, doi: 10.1088/1742-6596/582/1/012054.
- [53] J. Chi and H. Yu, "Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production," *Chinese J. Catal.*, vol. 39, no. 3, pp. 390–394, Mar. 2018, doi: 10.1016/S1872-2067(17)62949-8.
- [54] AFHyPAC, "Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau," pp. 1–12, 2015.
- [55] B. Salque, "Caractérisation mécanique de la respiration des hydrures pour une conception optimisée des réservoirs de stockage de l'hydrogène par voie solide." 2017.
- [56] B. To and H. A. L. Id, "Etude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible : réalisation d'un banc d'essai et modélisation To cite this version : HAL Id : pastel-00001338," 2005.
- [57] L. Julien, "L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés," École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007.
- [58] S. Rodosik, "Etude de l'impact d'architectures fluidiques innovantes sur la gestion, la performance et la durabilité de systèmes de pile à combustible PEMFC pour les transports," Université Grenoble Alpes, 2019.
- [59] M. Espinosa-López *et al.*, "Modelling and experimental validation of a 46 kW PEM high pressure water electrolyzer," *Renew. Energy*, vol. 119, pp. 160–173, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.081.
- [60] R. S. Gemmen, "Analysis for the Effect of Inverter Ripple Current on Fuel Cell Operating Condition," *J. Fluids Eng.*, vol. 125, no. 3, pp. 576–585, Jun. 2003.
- [61] C. Mokhtara, B. Negrou, N. Settou, A. Gouareh, and B. Settou, "Pathways to plus-energy buildings in Algeria: Design optimization method based on GIS and multi-criteria decision-making," in *Energy Procedia*, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.04.019.
- [62] M. M. Samy, S. Barakat, and H. S. Ramadan, "A flower pollination optimization algorithm for an off-grid PV-Fuel cell hybrid renewable system," *Int. J. Hydrogen Energy*, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.05.127.
- [63] B. W. Duffie JA, "Solar engineering of thermal processes," 2013.
- [64] S. Dahbi, R. Aboutni, A. Aziz, N. Benazzi, M. Elhafyani, and K. Kassmi, "Optimised hydrogen production by a photovoltaic-electrolysis system DC/DC converter and water flow controller," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 45, pp. 20858–20866, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2016.05.111.
- [65] C. Darras, "Modélisation de systèmes hybrides photovoltaïque/hydrogène: applications site isolé, micro-réseau et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H)." 2010.
- [66] T. E. Springer, T. A. Zawodzinski, and S. Gottesfeld, "Polymer electrolyte fuel cell model," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 138, no. 8, p. 2334, 1991.
- [67] J. Wishart, Z. Dong, and M. Secanell, "Optimization of a PEM fuel cell system based on empirical data and a generalized electrochemical semi-empirical model," *J. Power*

- Sources*, vol. 161, no. 2, pp. 1041–1055, 2006.
- [68] M. Uzunoglu, Mehmet;Onar, Omer;Alam, “Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system,” *J. Power Sources*, 2006.
- [69] A. B. Stambouli, Z. Khiat, S. Flazi, and Y. Kitamura, “A review on the renewable energy development in Algeria: Current perspective, energy scenario and sustainability issues,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 4445–4460, Sep. 2012, doi: 10.1016/J.RSER.2012.04.031.
- [70] M. J. Khan and M. T. Iqbal, “Dynamic modeling and simulation of a small wind–fuel cell hybrid energy system,” *Renew. Energy*, vol. 30, no. 3, pp. 421–439, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.05.013>.

Modélisation et simulation d'un système hybride de stockage énergétique dans un réseau autonome

Résumé

De nos jours, la production mondiale d'énergie est réalisée à partir de combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz), les énergies renouvelables (hydraulique, biomasse, solaire, éolien). Le sujet de ce travail est de mettre en évidence les méthodes et le stockage de la nouvelle électricité utilisant de l'hydrogène. Un système hybride d'énergie basée sur l'hydrogène est proposé comme solution pour maîtriser les variations à la fois du niveau de production d'électricité dans un réseau autonome et la consommation d'une localité donnée.

L'objectif de ce travail est d'évaluer les performances d'un système hybride dans un réseau autonome de production d'énergie électrique, couplant un réseau électrique, photovoltaïque et un système de stockage par l'hydrogène, composé d'un électrolyseur, d'une unité de stockage de gaz et d'une pile à combustible. L'hydrogène est l'unique moyen de stockage de l'électricité d'un point de vue technicoéconomique. Pour réaliser cette étude, nous avons développé un algorithme de résolution modélisant les différents composants du système. Les résultats de la simulation permettent de caractériser le fonctionnement du système d'hybridation dans une application autonome, de déterminer ses performances et d'évaluer l'influence des différentes pertes.

Mots clés : maîtrise d'énergie, système hybride, photovoltaïque, système autonome, hydrogène, électrolyseur, pile à combustible,

نمذجة و محاكاة نظام تخزين الطاقة الهجين في شبكة مستقلة

تلخيص

اليوم ، يتم إنتاج الطاقة العالمية من الوقود الأحفوري (النفط والفحم والغاز) والطاقات المتجددة (الهيدروليكية الكتلة الحيوية ، والطاقة الشمسية ، والرياح). موضوع هذا العمل هو تسليط الضوء على طرق وتخزين الكهرباء الجديدة باستخدام الهيدروجين. تم اقتراح نظام طاقة هجين قائم على الهيدروجين كحل للتحكم في الاختلافات في كل من مستوى إنتاج الكهرباء في شبكة مستقلة واستهلاك وحدة معينة.

الهدف من هذا العمل هو أداء نظام هجين في شبكة مستقلة لإنتاج الطاقة الكهربائية ، والاقتران بشبكة كهربائية وخلايا ضوئية ونظام تخزين الهيدروجين ، ويتكون من محلل كهربائي ، ووحدة تخزين غاز وخلية وقود. الهيدروجين هو الوسيلة الوحيدة لتخزين الكهرباء من الناحية الفنية والاقتصادية. لإجراء هذه الدراسة ، قمنا بتطوير خوارزمية دقة لنمذجة المكونات المختلفة للنظام. تسمح نتائج المحاكاة بتوصيف تشغيل نظام التهجين في تطبيق قائم بذاته ، لتحديد أدائه وحفظ تأثير الخسائر..

الكلمات المفتاحية: إدارة الطاقة ، النظام الهجين ، الكهروضوئية ، النظام المستقل ، الهيدروجين ، المحلل الكهربائي ، خلية الوقود ،

Modeling and simulation of a hybrid energy storage system in an autonomous network

Abstract

Today, global energy production is carried out from fossil fuels (oil, coal and gas), renewable energies (hydraulic, biomass, solar, wind). The subject of this work is to highlight the methods and storage of new electricity using hydrogen. A hydrogen-based hybrid energy system is proposed as a solution to control variations in both the level of electricity production in an autonomous network and the consumption of a given unit.

Objective of this work is the performance of an autonomous hybrid system for the production of electrical energy, coupling an electrical network, photovoltaic and a hydrogen storage system, composed of an electrolyser, a gas storage unit and a fuel cell.

Hydrogen is the only means of storing electricity from a technical and economic point of view. To carry out this study, we have developed a resolution algorithm modeling the different components of the system. The simulation results are used to characterize the operation of the hybridization system in a stand-alone application, to determine its performance and to save the influence of losses.

Keywords: energy management, hybrid system, photovoltaic, autonomous system, hydrogen, electrolyser, fuel cell.